

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2006

MARTIN DVOŘÁK

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Magisterský studijní program: strojní inženýrství

Studijní obor a zaměření: strojírenská technologie - obrábění a montáž

Výkonová optimalizace v rychlostním obrábění se zaměřením na aplikace v JUS

**Efficiency optimization in speed cutting with focus on applications by single-
purpose machines**

KOM -1000

Martin Dvořák

Vedoucí práce: Ing. Leoš Holub, CSc.

Konzultant: Doc. Ing. Ph.D. František Manlig, FS - KVS

Počet stran: 86

Počet příloh a tabulek: 10

Počet obrázků: 26

Počet modelů nebo jiných příloh: 0

30.4. 2006

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Výkonová optimalizace v rychlostním obrábění se zaměřením na aplikace v JUS***ANOTACE:***

Tato diplomová práce se zabývá problematikou vysokorychlostního obrábění převážně po stránce teoretické, ale i stránce aplikační. Práce je rozčleněna do pěti kapitol. První dvě kapitoly obsahují teoretické poznatky, které se týkají principu vysokorychlostního a výkonového obrábění a utváření třísky. Další dvě kapitoly pojednávají o progresivních řezných materiálech, které díky svým vlastnostem (tepelná stabilita) umožňují aplikace vysokorychlostního obrábění a jejich výkonovou optimalizaci. Závěr práce je věnován možnostem nasazení vysokorychlostního obrábění v JUS.

Efficiency optimization in speed cutting with focus on applications by single-purpose machines***ANNOTATION:***

This diploma thesis is focused on high speed cutting mainly in theoretical but also application aspects. The thesis is divided into five chapters. The first two chapters contain theoretical knowledge relating to the principle of high speed and efficiency cutting and chip formation. The next two sections dissert on progressive cutting materials, which allow due to their characteristics (thermal stability) the application of high speed cutting and their efficiency optimization. The last part of the thesis is dedicated to possibilities of setting of high speed cutting by single-purpose machines.

Klíčová slova: vysokorychlostní obrábění, jednoúčelové stroje, progresivní řezný materiál

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: 2006

Archivní označ. zprávy:

Počet stran: 86

Počet příloh: 0

Počet obrázků: 26

Počet tabulek: 10

Počet diagramů: 0

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména §60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci dne 30.4. 2006

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval rodičům, kteří mi umožnili studium na Technické univerzitě v Liberci, ing. Leošovi Holubovi, CSc. a celému kolektivu katedry obrábění a montáže.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	9
ÚVOD.....	12
1. VYČLENĚNÍ HSC ZE STANDARDNÍHO OBRÁBĚNÍ.....	13
1.1 Vymezení oblasti rychlostního obrábění	16
1.2 Energetická bilance řezného procesu.....	27
1.3 Pohledy na vysokorychlostní obrábění HSC(HIGH SPEED CUTTING).....	30
1.4 Rychlostní obrábění Al, Cu slitin	31
1.5 Souhrn vymezuujících předpokladů rychlostního obrábění	32
2. PODMÍNKY PRO UTVÁŘENÍ TŘÍSKY U OCELI, ŠEDÉ.....	33
LITINY, SLITIN HLINÍKU A MĚDI.....	33
2.1 Teorie utváření třísky	34
2.1.1 Přirozené podmínky utváření třísky.....	38
2.1.2 Nucené utváření třísky	40
2.2 Tříska pro řezné rychlosti nad 800m/min (ocel, litina)	44
3. PROGRESIVNÍ ŘEZNÉ MATERIÁLY S APLIKACÍ V HSC	45
3.1 Nástrojová ocel (NO).....	47
3.2 Stellity.....	49
3.3 Slinuté karbidy ≡ SK.....	49
3.4 Povlakované slinuté karbidy	54
3.5 Cermety.....	56
3.6 Coronite	57
3.7 Keramika.....	59
3.8 Kubický nitrid bóru – CBN	62
3.9 Diamanty.....	64
4. VÝKONOVÁ OPTIMALIZACE U SLINUTÝCH KARBIDŮ, POVLAKOVANÝCH SK, KERAMIKY	67
4.1 SK a povlakované SK na šedé litině.....	70
4.2 Řezná keramika na šedé litině	74
5. VYÚSTĚNÍ PRO APLIKACE V JUS – KONSTRUKČNĚ TECHNOLOGICKÉ ZÁVĚRY	76
5.1 Uspořádání HSC pro využití v JUS	78

5.2 Trvanlivost břitu v JUS	79
5.3 Současná omezení HSC obrábění v JUS	80
5.4 Druhá generace JUS, VUS, AUT. LINEK	82
ZÁVĚR	84
SEZNAM LITERATURY	86

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	- tloušťka odřezávané vrstvy
ad	- odkaz (k bodu)
Al	- hliník
Al ₂ O ₃	- oxid hlinitý
a _p	- hloubka řezu
a _t	- tloušťka třísky
atd.	- a tak dále
AUT.linky	-automatické linky
C	- uhlík
CBN	- kubický nitrid bóru
Co	- kobalt
Cr	- chrom
C _T	- konstanta materiálu obrobku + materiálu nástroje
Cu	- měď
D	- průměr obrobku
E _{dodaná}	- energie dodaná
E _{spotřebovaná}	- energie spotřebovaná
f	- posuv
F	- síla
Fe	- železo
Fe ₃ C	- karbid železa
HSC	- high speed cutting – vysokorychlostní obrábění
HSS	- označení rychlořezné oceli
IRA	- izotermický rozpad austenitu
ARA	- anizotermický rozpad austenitu
JUS	- jednoúčelový stroj
K	- součinitel přechování
m	- exponent řezné rychlosti
Mo	- molybden
Ms	- martenzit start
Mf	- martenzit finiš

n	- otáčky
NbC	- karbid niobu
Ni	- nikl
NO	- nástrojová ocel
OMNÓ	- ohraničená oblast primárních plastických deformací
ozn.	- označení
PDOP	- plastická deformace obrobku
P_e	- užitečný výkon obrábění
PKD	- polykrystalický diamant
pl.	- plastický
pl.m.o.	- plasticita materiálu obrobku
pozn.	- poznámka
R_e	- mez pevnosti ve smyku
R_m	- mez pevnosti v tahu
R_p	- mez kluzu ve smyku
Q_c	- celkové množství tepla
S	- průřez třísky (plocha)
Si	- křemík
Si_3N_4	- nitrid křemíku
SK	- slinutý karbid
S-N-O-P	- stroj-nástroj- obrobek-přípravek
SPD	- sekundární plastická deformace
T	- trvanlivost břitů nástroje [min]
TaC	- karbid tantalu
Ti	- titan
TiC	- karbid titanu
TiCN	- karbonitrid titanu
TiN	- nitrid titanu
tzv.	- tak zvaný
v	- rychlost
V	- výkon odebraného materiálu
v_c	- řezná rychlost
v_f	- posuvová rychlost
v_Q	- rychlost šíření tepla

VUS	- víceúčelový stroj
v_t	- rychlost třísky
V_t	- objem volně ložených nestlačených třísek
w	- objemový součinitel třísky
W	- wolfram
WC	- karbid wolframu
x	- exponent hloubky řezu ap
y	- exponent posuvu na otáčku f
ZrO ₂	- oxid zirkoničitý
θ	- střední teplota řezání
π	- konstanta (Rudolfovo číslo)
κ_r	- úhel nastavení hlavního ostří
φ	- úhel střižné roviny
σ	- normálové napětí
τ	- tečné napětí
ε	- plasticita materiálu obrobku
γ	- úhel čela

ÚVOD

Obrábění vysokými řeznými rychlostmi je považováno za významný směr ve vývoji obrábění. HSC technologie zahrnují kromě vlastního vysokorychlostního obrábění i takzvané suché a tvrdé obrábění. Tyto technologie jsou zaměřeny na dosažení řádově vyšší kvality a intenzifikaci řezného procesu, integraci strojních operací. Někteří výrobci obráběcích strojů hovoří o generačním skoku v intenzifikaci řezného procesu. Výrobci obráběcích strojů reagují na tento rychle rozvíjející se směr v technologii a přichází s nabídkou strojů, které jsou pro realizaci rychlostního obrábění vybaveny vysokootáčkovými vřeteny s dostatečným příkonem, moderními řídicími systémy a posuvovými mechanismy.

Práce řeší problematiku rychlostního obrábění po stránce teoretické i aplikační. Od vstupního analyticko-syntetického pohledu na rychlostní obrábění přechází k přístupu v oblasti progresivních řezných materiálů z pohledu trvanlivosti bříty nástroje. Tabelárně a graficky je zpracován soubor konstant Taylorova vztahu pro soubor řezných materiálů aplikovatelný na komplex rychlostního obrábění v členění pro řezné rychlosti v_c :

Vysoké - super vysoké - ultra vysoké

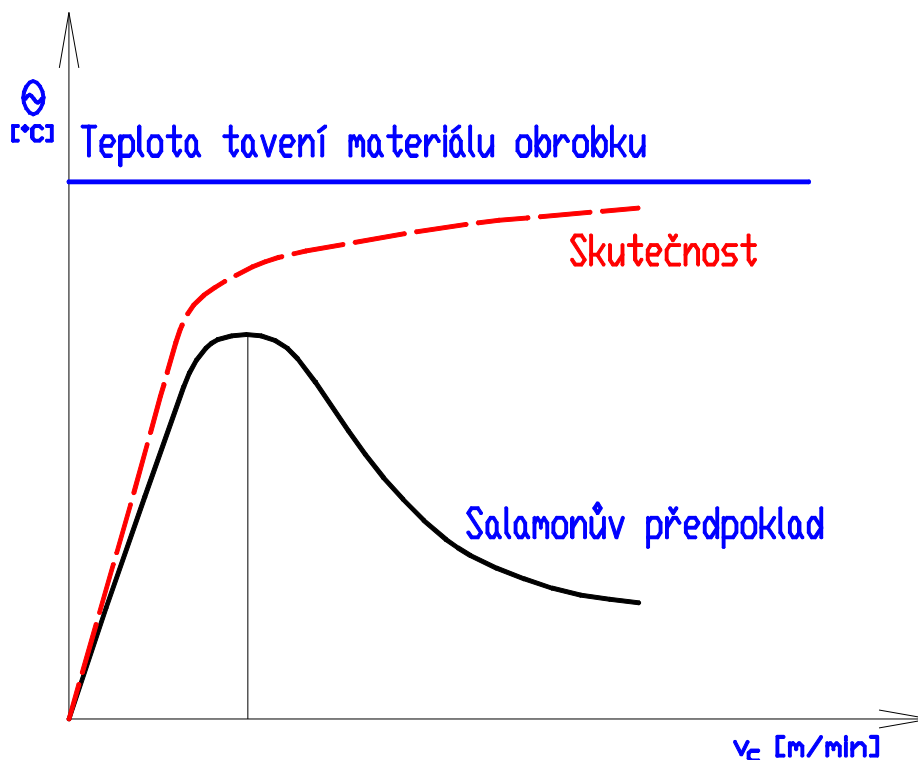
Vychází se z experimentálních řešení z let 2000 – 2003, která byla uskutečněna v rámci diplomových prací zadaných na katedře Obrábění a montáže TU Liberec. S přihlédnutím na možnosti a přístrojové vybavení laboratoře katedry KOM - TU Liberec.

Dílní výsledky, které nepokrylo vybavení laboratoře KOM, byly získány v rámci optimalizace linky (bloku motoru FABIA - 3 válec) ve ŠKODA - AUTO Mladá Boleslav.

Práce pokračuje řešením problematiky JUS (jednouúčelové stroje) v sériové a hromadné výrobě s aplikací rychlostního obrábění. Zde se vychází z analyticko-syntetického přístupu. Cílem je převést rychlostní obrábění právě do uvedené oblasti JUS a stanovit podmínky a současné omezení pro uvedený krok.

1. VYČLENĚNÍ HSC ZE STANDARDNÍHO OBRÁBĚNÍ

Myšlenka obrábění při použití velmi vysokých řezných rychlostech není nová. S touto myšlenkou použít velmi vysokých řezných rychlostí pro zvýšení řezného výkonu při frézování slitiny **Al** přišel v roce 1931 Salomon. Tuto myšlenku sám experimentálně ověřil. Aby dosáhl odpovídající řezné rychlosti, požil při frézování nástroj velkého průměru. Přitom vycházel z předpokladu, že se řezná teplota s rostoucí řeznou rychlostí nejprve zvětšuje a po dosažení určitého maxima dochází k jejímu poměrně rychlému poklesu. Pokles zdůvodňoval tím, že se primární plastická deformace v oblasti tvoření třísky s řeznou rychlostí zmenšuje, neboť stupeň plasticity materiálu je závislý na rychlosti deformace. S rostoucí řeznou rychlostí se materiál stává méně plastický. Tento předpoklad byl později na základě výzkumných prací vyvrácen a bylo prokázáno, že zpočátku rychlý nárůst teploty se zpomalí a střední teplota řezání se s rostoucí řeznou rychlostí asymptoticky blíží teplotě tavení obráběného materiálu.



Obr. č.1: Průběh střední teploty řezání θ v závislosti na řezné rychlosti v_c dle SALAMONA.

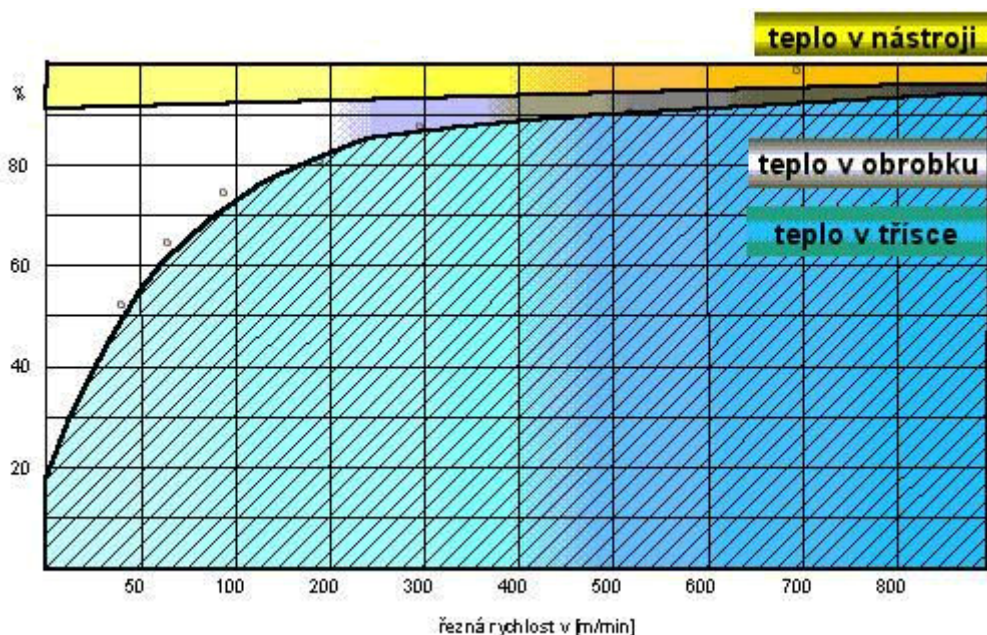
Po Salomonovi se této problematice věnovalo několik výzkumných laboratořích, které řešily základní problém existence poklesu teploty po dosažení maxima (viz. obr. č.1). Výsledky balistických zkoušek, při kterých bylo dosaženo řezných rychlostí řádově $v_c = 50\,000 \div 80\,000 \text{ m/min}$ sice potvrdily nižší úroveň řezných teplot i sil, ale s ohledem na dobu trvání záběru bříty s obrobkem (projektilem) řádu milisekund šlo o podmínky značně odlišné od zatížení bříty v reálném procesu obrábění.

Rozsáhlý výzkum této problematiky byl proveden v 70. a 80. letech v rámci programu DARPA(Defense Advanced Projects Agency) financovaného USAAF. Pozornost byla také věnována výzkumu tvorby třísky při obrábění slitin **Al**, titanu a superslitin vysokými řeznými rychlostmi.

Jak již bylo řečeno v úvodu *HSC* technologie zahrnují kromě vlastního *vysokorychlostního* obrábění i takzvané *suché* a *tvrdé* obrábění.

Vysokorychlostní obrábění sleduje zvýšení úběru třísek, jakosti obrobené plochy a trvanlivosti bříty nástroje podstatným růstem řezné rychlosti v_c .

Vysoká relativní rychlost třísky vůči čelní ploše nástroje společně s novou kvalitou řezné hrany zvyšuje podíl tepla odvedeného třískou. Přičemž dochází k poklesu tepelného a mechanického zatížení bříty nástroje, což má pozitivní vliv na trvanlivost bříty nástroje. Snížení tepelných toků do nástroje, stroje a do obrobku vede spolu se snížením řezných sil ke zvýšení geometrické přesnosti obrobku a jakosti obrobeného povrchu.



Obr. č.2: Schéma distribuce tepla v závislosti na řezné rychlosti - pro ocel.

Suché obrábění vylučuje nebo minimalizuje užití řezných kapalin a tím snižuje náklady na jejich filtraci a recyklování. Z důvodu nesnadného nulového řešení je častěji používáno *kvazisuché obrábění*. Při rapidním snížení řezné kapaliny je zachován pouze *efekt mazací*, který snižuje tření mezi třískou a nástrojem, a již se neuplatňují *efekt chladicí a odplavovací*. Podle některých publikovaných případů je spotřeba řezné kapaliny snížena až šedesáttisíckrát (= *ekologické obrábění*).

Tvrdé obrábění: Obrábění kalených ocelí a jiných velmi tvrdých materiálů náhradou za dříve používanou technologii broušení. Toto obrábění je především umožněno existencí řezného nástroje z kubického nitridu bóru, který si oproti diamantu zachovává svou tvrdost i za vysokých teplot (až do **2000 °C**), překračující teplotu tavení železných materiálů. Efekty vysokorychlostního obrábění se dostavují již při relativně nízkých řezných rychlostech ($v_c = 200 \text{ m/min}$). Mimo těchto základních technologií se uplatňují i další, např.:

- vysokovýkonné obrábění,
- vysokorychlostní odvalovací frézování,
- vysokorychlostní broušení,
- soustružení s podporou laseru.

Především je však nutno upozornit na fakt, že pro širokou aplikaci této metody zejména pro obrábění ocelí a litiny je limitním faktorem **řezivost přesněji řečeno mez tepelné stability** stávajících řezných materiálů, zejména slinutých karbidů a ostatních řezných materiálů, jako řezné keramiky a nástrojů s břity z kubického nitridu bóru a z polykrystalického diamantu.

Od realizace obrábění vysokými řeznými rychlostmi se očekávají následující výhody :

- a) zvýšení intenzity úběru – (zkrácení strojních časů),
- b) zlepšení jakosti (obecně integrity) obrobeného povrchu,
- c) snížení řezných sil,
- d) snížení podílu tepla vzniklého obráběním odvedeným obrobkem a tím i snížení tepelných deformací (zvýšení přesnosti),
- e) omezení nebezpečí vzniků chvění přesunem řezných podmínek mimo rozsah kritických vibrací soustavy stroj nástroj obrobek.

1.1 Vymezení oblasti rychlostního obrábění

Rychlostní obrábění se vyčleňuje z klasického obrábění standardními rychlostmi hlavního řezného pohybu označení v_c , které zpravidla nepřesahují 200m/min, pro materiál obrobku: OCEL A ŠEDÁ LITINA.

Řezná rychlost v_c patří do skupiny základních řezných podmínek takzvaně v UŽŠÍM SLOVA SMYSLU, což jsou:

Řezná rychlost: v_c [m/min], [m/s]

Posuv: f [mm/ot], [mm], [mm/ot, zub]

Hloubka řezu: a_p [mm]

Pro hlavní pohyb rotační rychlosti

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1.1)$$

můžeme zavést pojem posuvové rychlosti:

$$v_f = f \cdot n \quad (1.2)$$

Po úpravě:

$$vf = f \cdot v_c \cdot \frac{1}{\pi \cdot D} \quad (1.3)$$

kde **D** ... průměr obrobku [mm]

n ... značí otáčky stroje [ot/min]

v_f ... posunová rychlost [m/min]

Pro **f = konst.** , **D = konst.** je zřejmé, že **v_f** závisí pouze na **v_c**.

Tedy pro rychlostní obrábění platí: **VYSOKÉ v_c** i **v_f** vzhledem ke standardnímu obrábění.

Pozn.: **v_f** - obecně pro dvě až tři pravoúhlé souřadnice (x,y,z).

Dále: Vyjdeme-li z předpokladu zachování výkonu v objemu odebraného materiálu **V [mm³/min]**

$$\mathbf{V} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{v}_c \quad (1.4)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{f} \cdot \mathbf{a}_p \quad (\text{pro } \chi = 90^\circ) \quad (1.5)$$

je zřejmé, že pro **V = konst.** můžeme u rychlostního obrábění **SNÍŽIT** průřez třísky **S** (oproti standardnímu obrábění), čímž dojde ke snížení obecně všech složek řezné síly (**F_x** , **F_y** , **F_z**), kde **F_z** ($\equiv \mathbf{F}_c$) $\parallel \mathbf{v}_c$.

Když uvedenou úvahu zobecníme na potřebný výkon užitý k obrábění **P_e [W]**

$$\mathbf{P}_e = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} \quad (1.6)$$

kde

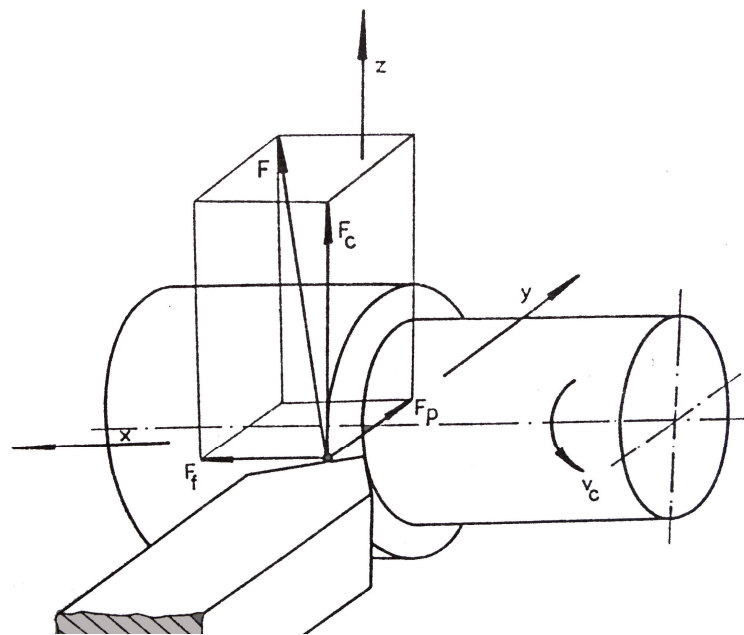
$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1.7)$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1.8)$$

A vyjeme-li z rozkladu sil do tří základních směrů pohybů, pak můžeme rovnici (1.6) psát ve tvaru

$$P_e = F_x \cdot v_x + F_y \cdot v_y + F_z \cdot v_z \quad (1.9)$$

a zavedením zjednodušujícího předpokladu, že $F_y \cdot v_y = 0$ a $v_c \gg v_f$



Obr. č.3: Působící síly při obábění.

získáme vztah

$$P_e \approx F_z \cdot v_c \quad (1.10)$$

kde

$$F_z = k_p \cdot S \quad (1.11)$$

k_p ... měrný řezný odpor [MPa]

Závěr:

Pro rychlostní obrábění platí, že zvýšením řezné rychlosti v_c je možno snížit silové namáhání obráběcího stroje ve všech složkách (F_x , F_y , F_z), při zachování výkonů V i P_e .

Mezní stavy pro pevnost i tuhost konstrukce - z pohledu statického - se sníží. Z pohledu dynamického - vlastní frekvence a uložení vřeten - se však nároky na tuhost vřeten zvyšují.

Zmenšení průřezu třísky dle vztahu (1.5) dále představuje přechod na dokončovací charakter obrábění (lepší kvalita obrobené plochy) při zachování výkonu odebraného materiálu V jako při původním hrubování.

V dalším textu se zaměříme na vymezení tématu z hlediska technologického:

Vycházet budeme z materiálu obrobku: ocel a šedá litina
a následně provedeme rozšíření pro: barevné kovy a lehké slitiny

Jak je zřejmé z hlediska teorie obrábění lze zobecnit:

$$\theta = f(v_c) \quad (1.12)$$

Průměrná teplota řezání θ je funkcí rychlosti hlavního řezného pohybu. Jedná se o průměr hodnot z teplotního pole v oblasti primárních plastických deformací - ozn. I. (viz. obr. č.11).

Tato oblast - společně s menší oblastí II (sekundárních) plastických deformací - je v bezprostředním styku s čelem a břitem řezného klínu. Zde dochází k realizaci tepelného toku z obrobku (třísky) do nástroje.

Tím se realizuje tepelné - následně teplotní - namáhání nástrojového (řezného) materiálu.

Dalším parametrem, který ovlivňuje množství převedeného tepla v materiálu obrobku (třísky) a rychlostí odchodu třísky po čele nástroje

$$v_t = \frac{v_c}{k} \quad (1.13)$$

kde k je součinitel přechování třísky

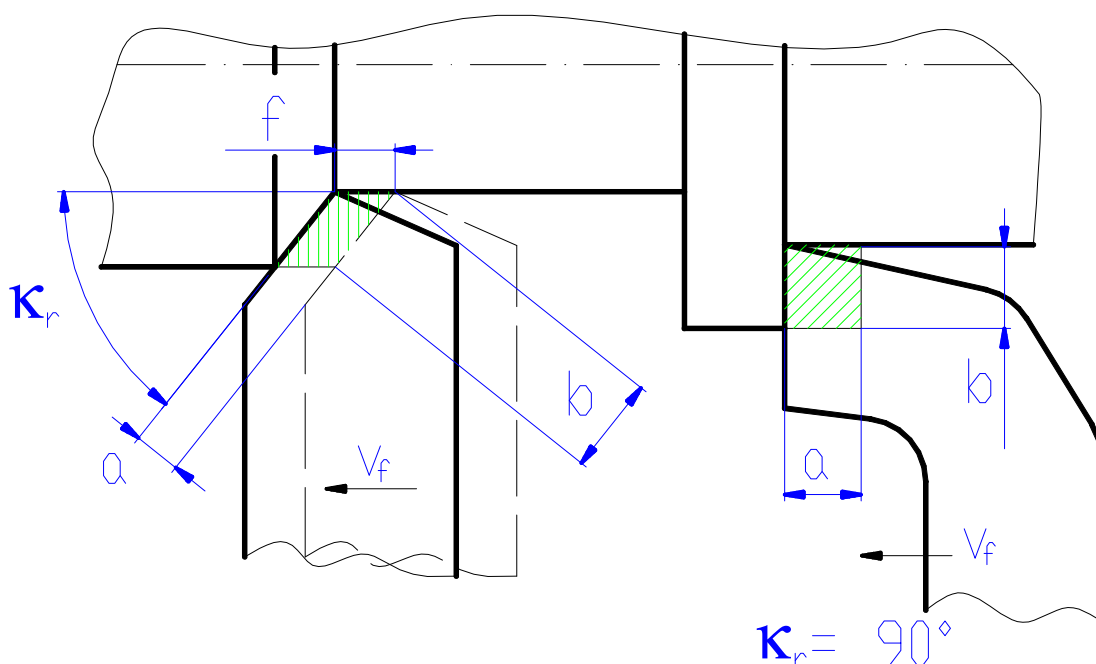
$$(k = \frac{a_t}{a}) \quad (1.14)$$

a_t ... tloušťka třísky

a ... tloušťka odřezávané vrstvy

(pro úhel nastavení břitu $\chi_r = 90^\circ$ je $a = f$)

$$a = f \cdot \sin \chi_r \quad (1.15)$$

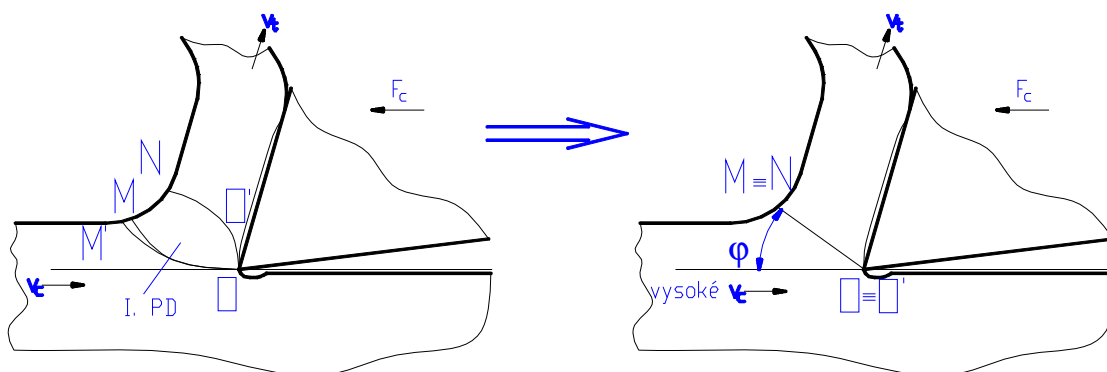


Obr. č.4: Vliv úhlu nastavení hlavního ostří χ_r na tloušťka odřezávané vrstvy a .

k se pohybuje v rozmezí hodnot (**1, 8**) a je funkcí velikosti plochy zóny primárních plastických deformací I. (ozn. **OMNÓ**).

Platí: ČÍM VĚTŠÍ PLOCHA I - TÍM VĚTŠÍ k

Pro vysoké řezné rychlosti v_c (již od **200m/min**) přechází čtyři hraniční body **OMNÓ** na dvoubodové uspořádání $O \equiv \acute{O}$, $M \equiv N$ - oblast I přechází do přímky se sklonem φ - **úhel střížné roviny** - viz. obr. č.5. Koeficient $k \approx 1$.



Obr. č.5: Oblast **OMNÓ I** plastických deformací při vysokých v_c .

Primární plastické deformace jsou nedostatečně rozvinuty, následkem čehož má tříska sklon k plynulosti (pro ocel). Jev je dále ovlivněn dalšími činiteli - tzv. **NEOPOMENUTELNÍ ČINITELÉ PŘIROZRNÉHO UTVÁŘENÍ TŘÍSKY** - viz. následující **kapitola 2.1.1**

Jak plyne z předešlého, je $k = 1$, pro $v_c \geq 200 \text{ m/min}$. Přechování tloušťky třísky mizí a rychlost odchodu třísky v_t se blíží hodnotě v_c .

Tedy: $k \approx 1 \rightarrow v_t \approx v_c$. Nedochází ke zpomalení odchodu třísky, což je další vymezení rychlostního obrábění.

v_c je však pro rychlostní obrábění vysoká ($v_c > 200 \text{ m/min}$, $v_c \gg 200 \text{ m/min}$)

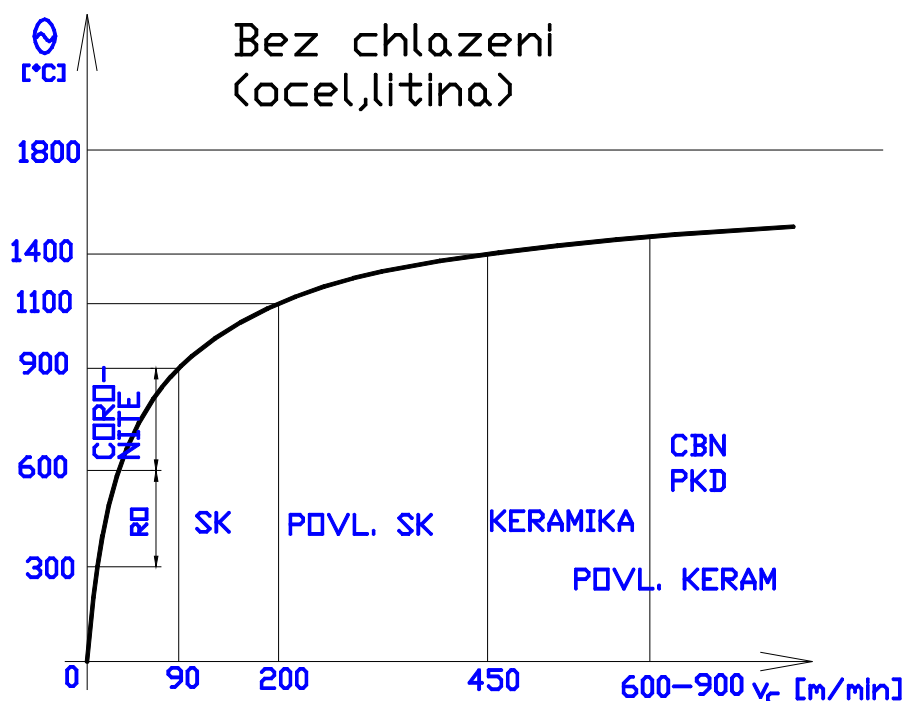
Do problému přistupuje rychlost řízení tepla v_Q v materiálu obrobku. Ta se rovná zhruba **900m/min** pro OCEL a LITINU.

Označíme-li: $v_Q = 900 \text{ m/min}$ (ocel a šedá litina), platí pro: $v_c \geq v_Q$, že *teoreticky* veškeré vznikající teplo v zóně **OMNÓ** odejde z prostoru čela nástroje zafixováno ve třísce, aniž by se (jen částečně) převedlo do nástroje.

Prakticky to znamená, že při rychlostním obrábění klesá přestup tepla do nástroje, což příznivě ovlivňuje nároky na použitý řezný materiál.

Výše uvedený jev je dvojnásobně pozitivní v situaci, kdy vývoj nových řezných materiálů (tepelně odolných) *asymptoticky kulminuje*. Přínosy začínají stagnovat při vysoké ekonomické náročnosti vývoje. Průřez progresivními řeznými materiály bude následovat.

Průběh průměrné teploty řezání θ na řezné rychlosti v_c viz. vzorec (1.12) lze orientačně zachytit grafem



Obr. č.6: Grafická závislost $\theta = f(v_c)$.

Poznámka: V lineární oblasti grafu lze použít tzv. *METODU PŘÍPISOVÁNÍ NULY*

$$90 \text{ m/min} \rightarrow 900^\circ\text{C}$$

Graf určuje další pohled na vymezení pojmu rychlostního obrábění.

Uvedeným teplotám musí - při zachování řezivosti a úměrné trvanlivosti - odolávat řezný materiál. V grafu jsou orientačně zaneseny hlavní představitelé

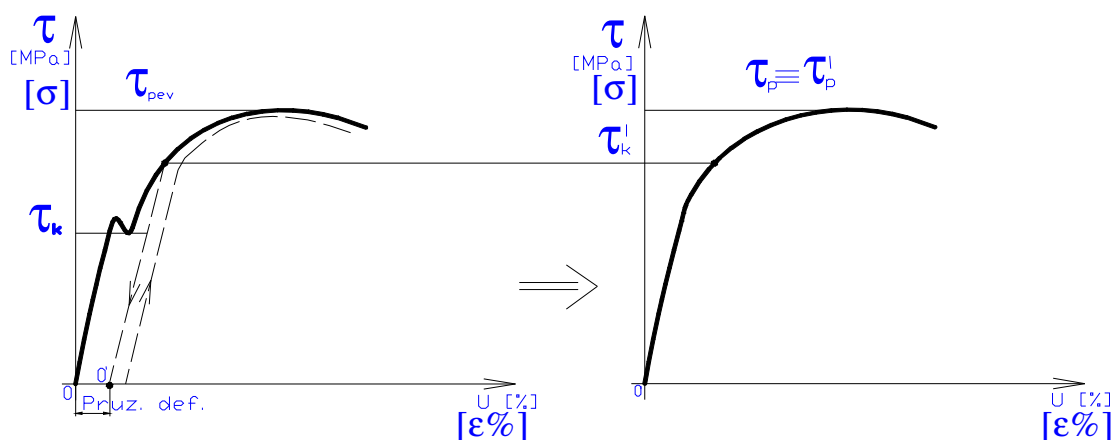
progresivních řezných materiálů s aplikací v klasickém, rychlostním, super rychl. a ultra rychlostním obrábění.

Další pohled na teploty při obrábění (zaměřeno na ocel a šedou litinu) poskytne rozbor rovnovážného dvousložkového diagramu **Fe–Fe₃C**, (**Fe –C**) pro klasický stav materiálu obrobku (po žíhání).

Pro úplnost:

Pro rovnovážný stav materiálu obrobku (ocel, litina) - tudíž bez tepelného zpracování a průměrné teploty řezání blízké teplotě zhruba **200°C** ($\approx v_c = 20\text{m/min}$) se v plné míře uplatňuje tak zvané **ZPEVNĚNÍ MATERIÁLU OBROBKU ZA STUDENA** (pro napětí normální i tečné), které je příčinou až trojnásobného zpevnění třísky oproti původnímu materiálu. Trojnásobek se týká nárůstku a představuje horní hranici zpevnění. Vše pro standardní podmínky obrábění. Materiál nástroje v rozmezí rychlořezná ocel - nepovlakovaný slinutý karbid.

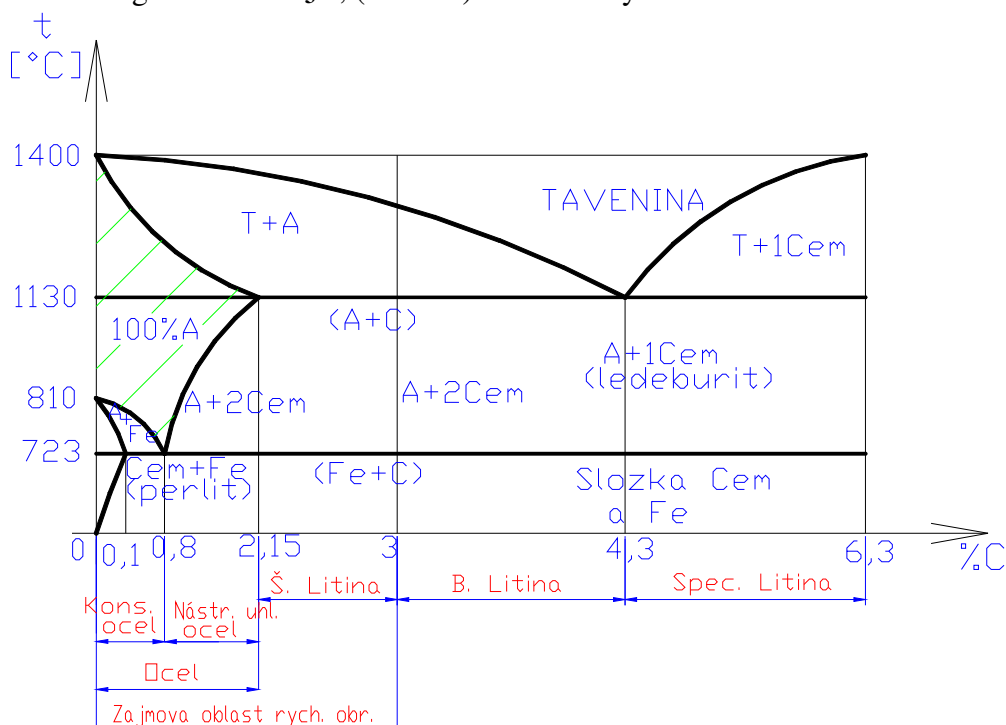
Eliminace uvedeného zpevnění je dalším příznivým vlivem **RYCHLOSTNÍHO A VÝKONOVÉHO OBRÁBĚNÍ** zasahujícího do oblasti ohřevu materiálu třísky nad teploty **721°C** - AUSTENIT a materiál nástroje **POVLAKOVANÝ SK, KERAMIKA, PKD, CBN**.



Obr. č.7: Zpevnění - odpevnění materiálu za studena.

Následně pak **IRA - ARA diagram** („S“ křivky) pro materiál (ocel) v kaleném a zušlechtěném stavu. Rychlostní obrábění zde bývá označováno jako **VÝKONOVÉ** (výkonnostní) obdobně jako u **HLUBOKÉHO VRTÁNÍ ZUŠLECHTĚNÝCH LEGOVANÝCH OCELÍ** (případně litiny). Řezné rychlosti zde vykazují hodnoty **100 ± 30m/min**. Teploty **θ 70 -700 - (1100)°C**.

Rozbor diagramu **Fe-Fe₃C, (Fe -C)** – šedé litiny



Obr. č.8: Rovnovážný diagram a vysokorychlostní obrábění

Do 723°C	→ 70 - 90 m/min	oblast <i>klasického</i> obrábění
200 - 800°C	→ 70 - 130 m/min	oblast VÝKONOVÉHO obrábění
800 - 1130°C	→ 200m/min	hranice <i>rychlostního</i> obrábění
1130 -1400°C	→ 450m/min	hranice <i>velmi vysokých</i> rychlostí
1400°C	→ 600 - 900m/min	ULTRA VYSOKÉ RYCHLOSTI

Zásadou je uplatňovat teploty přítomnost austenitu až taveniny - tedy rozmezí **723 - 1130°C - 1400°C**.

Austenit → kujný (tvárný) stav oceli nebo složky litiny.

Odpor materiálu proti řezání (obrábění) rapidně klesá! Efekt je umocněn přítomností složky - tavenina.

Tím je poukázáno na další pohled na rychlostní obrábění a jeho princip.

Podmínkou je, aby byl k dispozici řezný materiál, který by uvedený rozsah odpovídajících teplot θ pokrýval se zachováním řezivosti a žádané trvanlivosti **T [min]**. Odolával otěru (při nižších teplotách $\approx 400^{\circ}\text{C}$), difuzi (při vyšších teplotách - **nad 600°C**), adhezi austenitu a taveniny (**nad 1100°C**). Viz. povlakované SK, povlakovaná keramika.

Pro úplnost:

Vedle již uvedených přínosů rychlostního obrábění je třeba podtrhnout kumulaci hrubovacího a dokončovacího obráběcího efektu. (Vysoký úběr při vysoké kvalitě povrchu).

Ekologie obrábění - práce převážně až výhradně *BEZ ŘEZNÝCH KAPALIN* (aby se nastartoval efekt působení austenitu - taveniny v oblasti **OMNÓ**). Kompromis představuje použití mlhy.

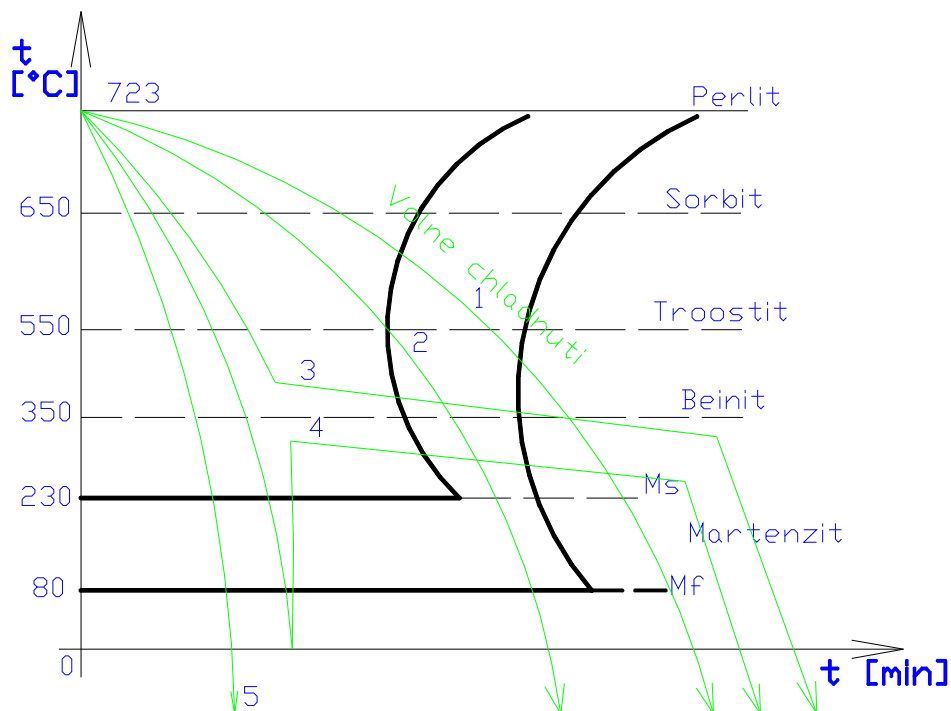
Dále: **IRA - ARA** diagram a *VÝKONOVÉ OBRÁBĚNÍ* - jako druh rychlostního obrábění (ocel kalená - popuštěná).

Jedná se o nerovnovážný stav oceli obrobku a jeho třískové obrábění v rozmezí teplot :

Ms - Mf $\rightarrow 723^{\circ}\text{C}$ (viz. rovnovážný diagram **T-Fe₃C**).

Ms martenzit start 230 - $\approx 330^{\circ}\text{C}$ dle % uhlíku a legúr.

Mf martenzit finish 80 - $\approx 180^{\circ}\text{C}$ (viz. obr. č.9)



Obr. č.9: IRA-ARA diagram a výkonové obrábění zušlechtěné oceli

Kde:

1. → volné chlazení bez zušlechtění
2. → forma zušlecht'ování na mezistruktury (plynulá)
3. → forma zušlecht'ování na mezistruktury - klasická (isotermická)
4. → zušlecht'ování teplem zevnitř
5. → 100% kalení - (martenzit)

Zachycené průběhy 1 - 5 z oblasti tepelného zpracování lze využít zpětně při obrábění. Jmenovitě se jedná o případy 3 a 4 s překročením obou nosů křivek „S“. - popuštění nerovnovážných struktur v **OMNÓ**.

Klasické **VÝKONOVÉ OBRÁBĚNÍ** lze tudíž situovat mezi teploty **80-230°C** na straně 100% Martenzitu - kalená ocel a pod **723°C** těsně pod mezí austenitu (začátek perlitu). Pro řezné rychlosti **v_c okolo 100m/min** a kalený - případně zušlechtěný ocelový materiál obrobku.

Pozn. 1: Prakticky se můžeme pohybovat i nad hranicí **723°C**, kdy dojde nejen k vyrušení kalení (zušlechtění), ale i k využití tvárných vlastností austenitu.

Tolik tedy další pohled na (tentokrát spodní mez) rychlostního obrábění, kterým
VÝKONOVÉ OBRÁBĚNÍ VE SKUTEČNOSTI JE!

Aplikují se zde veškeré řezné materiály od SK až po CBN. Pro nízké rychlosti (**80m/min**) dokonce i PKD → který se jinak pro obrábění oceli nedoporučuje (s ohledem na afinitu k uhlíku ve tvaru **Fe₃C**).

1.2 Energetická bilance řezného procesu

Při obrábění se břit nástroje pohybuje vůči obrobku řeznou rychlostí v_c a působením řezné síly F_c odřezává z obrobku určitou vrstvu o tloušťce a_p , která odchází ve formě třísky.

Pro oddělení třísky je zapotřebí vynaložit mechanickou energii nebo vztaženo na jednotku času určitý výkon dle uvedeného vztahu (10).

Prakticky veškerá mechanická energie vynaložená pro obrábění na odřezání třísky se přemění v teplo.

$$E_{\text{dodaná}} \geq E_{\text{spotřebovaná}} \quad (1.16)$$

Tedy celkové množství tepla vzniklého při obrábění za jednotku času je dáno vztahem:

$$Q_c = F_c \cdot v_c \quad (1.17)$$

kde Q_c ... celkové množství tepla vzniklé při odřezávání třísky [J / min]

Hlavními zdroji tepla při odřezávání třísky jsou primární plastické deformace v oblasti tvoření třísky a tření mezi třískou a čelem a hřbetem a plochou řezu a pružné deformace.

Celkové množství tepla vzniklého při obrábění je dáno součtem :

$$Q_c = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (1.18)$$

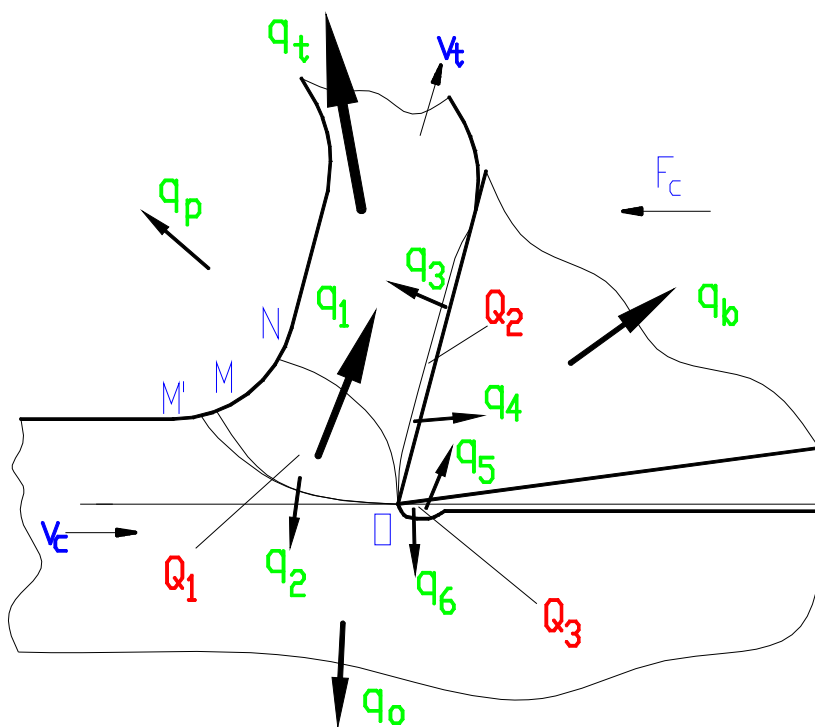
kde Q_1 ... teplo vzniklé plastickou deformací v oblasti tvoření třísky

Q_2 ... teplo vzniklé třením ve styku třísky – čelo

Q_3 ... teplo tření ve styku hřbet – plocha řezu

Q_4 ... teplo vzniklé působením pružných deformací

Při obrábění plastických materiálů je množství tepla Q_4 zanedbatelné, avšak při obrábění křehkých materiálů (např. litiny) může být podíl tepla Q_4 na celkovém množství tepla Q_c při obrábění podstatný. Při obrábění křehkých materiálů (litina, bronz aj.) je velikost plastické deformace odřezávané vrstvy (která se obvykle omezí jen na oblast přiléhající k čelu) velmi malá a tedy i složka Q_1 tu bude malá. Jestliže vzniká drobná třísky, je styková plocha mezi třískou a čelem nástroje velmi úzká, takže i složka Q_2 obvykle dosahuje menších hodnot než u oceli. Potom hlavním zdrojem tepla při obrábění křehkých materiálů bude tření ve styku hřbet – plocha řezu (teplo Q_3) a práce pružných deformací (teplo Q_4). Poněvadž však při pružné deformaci vzniká podstatně méně tepla než při plastické deformaci, budou střední řezné teploty při obrábění litiny menší než jsou teploty při obrábění oceli za stejných podmínek.



Obr. č.10: Schématicky jsou naznačeny místa vzniku tepla a směry jeho odchodu

$$Q_{\text{Dodané}} = Q_{\text{Odvedené}} \quad (1.19)$$

$$Q_{\text{Odvedené}} = q_t + q_b + q_o + q_p \quad (1.20)$$

q_p ... teplo odvedené do okolního prostředí.

Teplo Q_1 vzniklé v oblasti tvoření třísky odchází z větší části s třískou. Schématicky je toto množství tepla na obr. č.10 označeno q_1 . Do třísky přechází i část tepla q_3 , které vznikne ve styku tříska – čelo. Celkové množství tepla, které přejde do třísky q_t , je potom :

$$q_t = q_1 + q_3 \quad (1.21)$$

Do břitu přechází jednak část tepla q_4 vzniklého třením ve styku tříska – čelo a jednak teplo z tření na hřbetě q_5 . Celkové množství tepla odvedené břitem nástroje q_b je potom dáno součtem :

$$q_b = q_4 + q_5 \quad (1.22)$$

Velký význam má pro množství tepla q_4 i tepelná vodivost povlaku na břitových destičkách SK. Čím nižší je tepelná vodivost povlaku, tím menší množství tepla q_4 přejde do břitu a tím nižší je intenzita vymílání čela nástroje. Povlaky, které sestávají ze směsi nitridů karbidů nebo oxidů kovů bez čistě kovové složky působí obecně jako izolační vrstva. Tento účinek násobí i jejich antifrikční účinek, který rovněž omezuje množství tepla generovaného v kontaktní ploše tříska – čelo třením..

Do obrobku přechází jednak menší část tepla vzniklého plastickou deformací v oblasti tvoření třísky q_2 a jednak část tepla z tření ve styku hřbet – plocha řezu q_6 . Celkové množství tepla odvedené obrobkem q_o je potom dáno součtem:

$$q_o = q_2 + q_6 \quad (1.23)$$

1.3 Pohledy na vysokorychlostní obrábění HSC(HIGH SPEED CUTTING)

První pohled:

vysoké v_c	600 - 1800 m/min
super vysoké v_c	1800 - 18 000 m/min
ultra vysoké v_c	nad 18 000 m/min

bez určení materiálu obrobku

Pro těžkoobrobitelný materiál (slitina Ni, Ti) → *VÝKONOVÉ OBRÁBĚNÍ*.

Druhý pohled:

v_c desetinásobek rychlosti konvenční pro daný materiál obrobku.

Třetí pohled:

HSC → tehdy, když teplota řezání dosáhne hodnot blízkých teplotě tavení obráběného materiálu. To odpovídá oblastem nad teplotu **1130°C** (ocel, šedá litina).

Z hlediska tvorby třísky - vysoká v_c pro případ, že **OMNÓ** tvoří přímku a lokální smyky, bez intenzívní plastické deformace. To odpovídá dříve uvedeným závěrům o součiniteli pěchování třísky **k** a tendenci třísky k plynulosti.

Čtvrtý pohled:

V současnosti převládá uplatnění *HSC* u materiálů obrobku s nízkou teplotou tavení (HLINÍK A JEHO SLITINY).

Pro vyšší mechanické vlastnosti - vznik potíží, hlavně u ocelí v zušlechtěném stavu.

1.4 Rychlostní obrábění Al, Cu slitin

Zatímco pro ocel a litinu je toto omezení dáno vztahem mezi teplotami taveniny ($\sim 1400^\circ\text{C}$, u legovaných ocelí $\sim 1600^\circ\text{C}$) a teplotní odolnosti řezného materiálu (povlakované SK, keramika, povlakovaná keramika, CBN) – v hodnotách **1400÷1700** $^\circ\text{C}$. Tedy vzájemně hraníční stav. Nyní s počínající rezervou na straně nástroje.

Pro **Al, Cu** slitiny jsou teploty taveniny v rozsahu **600÷1100** $^\circ\text{C}$, tedy podstatně níže než **1400** $^\circ\text{C}$ a těchto hodnot (**1400÷1700** $^\circ\text{C}$) nemohu teoreticky dosáhnout.

Hliník, slitiny hliníku, mosazi, bronzu tvoří rovněž dvousložkové i vícesložkové rovnovážné diagramy (obdoba **Fe – Fe₃C**).

Pro rozmanitost průběhů křivek dle konkrétní slitiny pro tento účel postačí vycházet z uvedených údajů z literatury:

Souhrn z literatury:

Hliník	$v_c = 8000\text{m/min}$
Plasty s vlákny	$v_c = 9000\text{m/min}$
Bronz, mosaz	$v_c = 7000\text{m/min}$

Pozn.: Jedná se zřejmě o *ULTRA RYCHLYCHLOSTNÍ.OBRÁBĚNÍ*.

Hliník	$v_c = 3000 - 5000 \text{ m/min}$
Plast s vlákny	$v_c = 3000 - 5000 \text{ m/min}$

Pozn.: Jedná se zřejmě o *VYSOKÉ - SUPER VYSOKÉ* oblasti rychlostního obrábění.

Závěr pro **Al, Cu** slitiny:

Řezné rychlosti v_c rychlostního obrábění zde nejsou teoreticky shora omezeny.

Pozn.: - Je to zřejmě jeden z důvodů proč se rychlostní obrábění počalo prvotně uplatňovat hlavně u těchto slitin (současné řezné materiály nebyly rozšířeny).

1.5 Souhrn vymezuujících předpokladů rychlostního obrábění

- Řezná rychlost $v_c \geq 200\text{m/min}$
- (Řezná rychlost $v_c \in (80, 130)\text{m/min}$ - *VÝKONOVÉ A HLUBOKOVRTACÍ*)
- Teplota řezání $\theta \geq 723^\circ\text{C}$
- Teplota řezání $\theta \in (230^\circ\text{C}, 723^\circ\text{C})$ - *VÝKONOVÉ A HLUBOKOVRTACÍ*
- Oblast OMNÓ přechází v přímku
- Součinitel přechování třísky $k = 1$
- Třísky u materiálů „ bez podpory plasticity“ → OCEL - *PLYNULÁ*.
- Problematické jak přirozené tak nucené (klasické) utváření třísky ocelové.
- Trvá bezproblémové přirozené utváření třísky litinové.
- Pro super a ultra hodnoty v_c nutné speciální nucené utváření
(torsní kmity, osové kmity, utváření soustavy)
- Bez aplikace řezných kapalin s podporou přerušovaného řezu
- Nutnost aplikace progresivních řezných materiálů (Teploty!).
- Obrábění teplotami θ (v OMNÓ) v oblasti austenitu až taveniny.
- Rozsah teplot θ $723^\circ\text{C} - 810^\circ\text{C} - 1130^\circ\text{C} - 1400^\circ\text{C}$ (ocel, litina).
- Blízké *EKOLOGICKÝM* obráběcím metodám (bez kapalin).
- Snížené průřezy třísek při zachování obráběcího výkonu.
- Snížení sil a z toho plynoucího namáhání i opotřebení jak bříty tak vedení.
- Zlepšení kvalitu povrchu (dokončovací charakter).
- Zvýšení nároků na pohony vřeten a jejich uložení.
- Vyšší zrychlující síly a momenty - nutnost jejich eliminace.
- (Toto odpadá u posuvů – v_f u JUSů nejsou extrémní).

Závěr:

Aplikace *rychlostního* (i *VÝKONOVÉHO*) obrábění do JUS, VUS, AUT.LINEK je *bezproblémovější* než u CNC techniky – z důvodů nižší náročnosti na *POHONY POSUVŮ* (x, y, z).

Tolik k *TEORETICKÝM* závěrům z rychlostního obrábění.

2. PODMÍNKY PRO UTVÁŘENÍ TŘÍSKY U OCELI, ŠEDÉ LITINY, SLITIN HLINÍKU A MĚDI

Třískové obrábění je velmi složitý proces, který závisí na mnoha vlivech. Jednou z nejdůležitějších charakteristik při obrábění je schopnost nástroje zajistit vhodný tvar třísky a její odchod z místa řezu. Pod pojmem vhodný tvar třísky rozumíme takový, při němž třísky zabírají co nejmenší objem, snáze je lze odebírat z místa ve stroji, kde se hromadí, nebrání činnosti manipulátorů a systémům pro automatickou výměnu nástrojů, nedochází k poškození obrobené plochy a řezného nástroje a netvoří nebezpečí zranění obsluhy daného obráběcího stroje.

Podmínka utváření třísky v JUS a LINKÁCH je stěžejní pro uplatnění automatizace cyklu stroje i stroje jako celku.

K hodnocení utváření třísky použijeme tzv. objemový součinitel třísky W .

$$W = \frac{V_t}{V_m} \quad (2.1)$$

V_t objem volně ložených nestlačených třísek

V_m objem odebíraného materiálu obrobku

$W \leq 50$ utvářená tříska (článekovitá, elementní)

$W > 50$ neutvářená tříska ... (plynulá)

K vysvětlení pojmu: $W = 50$ znamená, že délka segmentu třísky je rovna 30-50 mm.

(Dle přístupu podniků KOVOŠROT) - výkupní cena třísky

Vyhovuje i pro potřeby AUTOMATIZACE ODTRŽSKOVÁNÍ a zpracování třískového odpadu v hutní prvovýrobě. Diagramy nuceného utváření jsou řešeny pro hranici $W = 50$.

Z výše uvedeného vyplývají důvody ekonomické (třískové hospodářství), bezpečnostní a technické (automatizace).

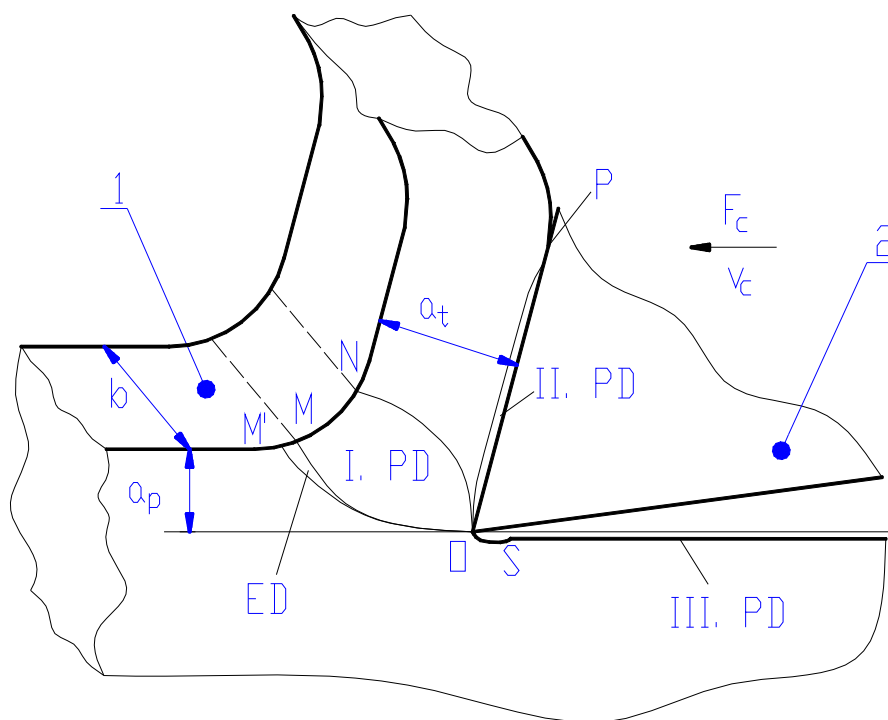
2.1 Teorie utváření třísky

Tvorba třísky je složitý mechanicko-fyzikální děj ovlivňovaný mnoha různými činiteli. Řezný proces technických materiálů probíhá za trvalého zatěžování odřezávané vrstvy řezným nástrojem.

U krystalických látek (především kovů) dochází vlivem tohoto zatížení k plastické deformaci obráběného materiálu, čili k jeho tváření (= tříska tvářená). U nekystalických (amorfních) látek (plasty, sklo) se tříska odděluje křehkým lomem nebo štěpením. Vznikající tříska není plasticky deformována (= tříska netvářená).

Mechanismus vzniku obou druhů třísek se značně liší. Stupeň plasticity kovů a slitin záleží na jejich chemickém složení, struktuře materiálu a na deformačních podmínkách (teplota, deformační rychlost, stav napjatosti). V závislosti na stupni plasticity obráběného kovu předchází vzniku třísky tvářené menší nebo větší plastická deformace. [6]

Současná představa o mechanismu tvorby třísky vychází z experimentálních a analytických výzkumů. K tvorbě třísky dochází v určitých oblastech, jak je patrné z následujícího obrázku:



Obr. č. 11: Oblasti pružných a plastických deformací

VÝZNAM SYMBOLŮ:

- 1 - obrobek
- 2 - řezný nástroj
- a_p - záběr (hloubka záběru)
- a_t - tloušťka třísky
- b - šířka záběru
- ED - oblast pružných (elastických) deformací
- I. PD - oblast primárních plastických deformací
- II. PD - oblast sekundárních plastických deformací (SPD)
- III. PD - oblast plastických deformací obrobeného povrchu
- M'O - počátek ED
- MO - počátek I. PD
- NO - konečná hranice I. PD
- MN - vnější hranice I. PD
- O P - oblast kontaktu třísky s čelem nástroje (SPD)
- O S - oblast kontaktu obrobené plochy se hřbetem nástroje (PDOP)

Primární plastické deformace mají rozhodující vliv, dodávaná energie se mění na deformační energii a přitom vzniká teplo. Plastické deformace probíhající v oblasti

OMNO mají za následek nejen transformaci odřezávané vrstvy v třísku, ale i změnu jejích rozměrů a vnitřní stavby.

Sekundární plastická deformace vzniká vlivem vysokých teplot a tlaků. Při této deformaci popraskají vrstvy kysličníku na povrchu nástroje. Tím vzniká kontakt čistých kovových ploch, při němž se výrazně uplatní adhezní síly a dochází k místnímu navařování. Vlivem dalšího pohybu třísky proti nástroji dochází k rozrušování těchto mikrosvarů. [6]

Plastické deformace obrobeného povrchu vznikají vlivem podtékání a smýkání materiálu pod ostří a po hřbetě břitu nástroje.

Podstatu vzniku a druhy třísek podchycuje níže uvedený graf. Je zde znázorněna závislost normálových (σ) a tečných (τ) napětí.

Vyznačené meze:

R_m mez pevnosti v tahu [MPa]

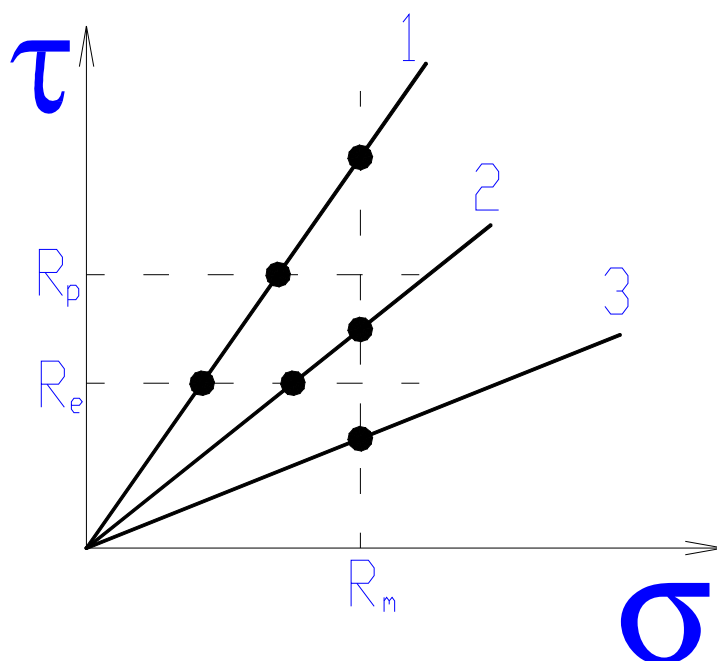
R_e mez kluzu ve smyku [MPa]

R_p mez pevnosti ve smyku [MPa]

Přímka 1 – tvářená: Při zatěžování břitem řezného nástroje dochází k poměrně strmému nárůstu smykových i normálových napětí. Po překročení bodu na mezi kluzu ve smyku se začnou projevovat plastické deformace a narůstají až na bod meze pevnosti ve smyku a dojde k porušení materiálu (odděluje se tříška). Při dalším zatěžování se dostaneme na mez pevnosti v tahu a tříška je definitivně oddělena (= **tříška plynulá**).

Přímka 2 – částečně tvářená: Při zatěžování se dostaneme na bod meze kluzu ve smyku a začíná plastická deformace, která je přerušena dosažením meze pevnosti v tahu a tříška je vytržena z materiálu obrobku (= **elementní tříška**).

Přímka 3 – netvářená: Při zatěžování se nejdříve dosáhne bodu na mezi pevnosti v tahu a element třísky je odlomen ještě dříve než dojde ke vzniku jakékoliv plastické deformace (= **netvářená tříška**) [7]

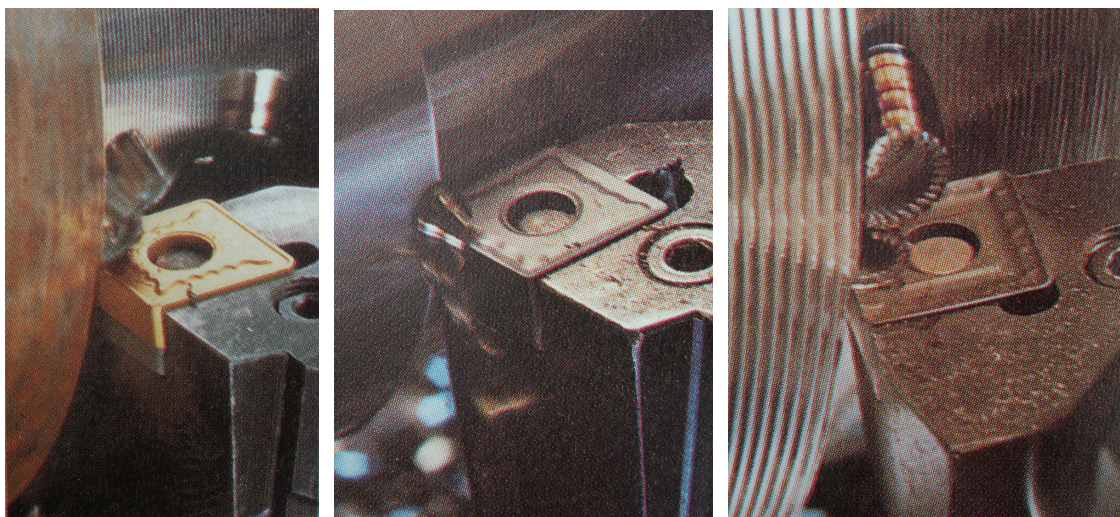


Obr. č.12: Graf funkce $\tau = f(\sigma)$

Tvar třísky vzniklý při procesu řezání je závislý na řadě faktorů. Rozhodující vliv zde má obráběný materiál (druh, pevnost, tvrdost, stav, tvar a velikost), vlastnosti řezného materiálu (otěruvzdornost, tření na čele bříty), řezné podmínky (posuv, hloubka řezu, řezná rychlost, řezné prostředí), geometrie bříty, technologické podmínky a konstrukce utvařeče. Utváření třísky se tak stává samostatnou oblastí technologie zaznamenávající mimořádného rozvoje.

Utváření třísky nastává počínajícím zakřivením při zářezu nástroje do obrobku, přičemž poloměr zakřivení je charakteristickým rozměrem stupně utváření (vše v závislosti na již zmíněných faktorech). Při pokračujícím pohybu nástroje vůči obrobku naráží tříska na překážku, na které dochází k lomu. Existují rozdílné druhy lomu třísky:

- samočinný lom;
- lom třísky na hřbetu nástroje – příčina vzniku „kladivového efektu“, který vyvolává zatížení v oblasti bříty;
- lom o obrobenou nebo obráběnou plochu.



Obr. č.13: Vyobrazení možného lomu třísky.

Požadovaného tvaru třísky lze docílit:

- a) přirozeným utvářením - volbou a kombinací přirozených podmínek,
- b) nuceným utvářením - aplikací technických prostředků.

2.1.1 Přirozené podmínky utváření třísky

Na přirozené utváření třísky mají vliv neopomenutelní a opomenutelní činitelé.

a) Neopomenutelní činitelé:

$v_c [m / min]$	řezná rychlost
$f [mm / ot]$	posuv (nebo a - tloušťka třísky pro $\kappa_r = 90^\circ$)
$a_p [mm]$	hloubka řezu (nebo b - šířka třísky pro $\kappa_r = 90^\circ$)
$\gamma [^\circ]$	úhel čela
$\epsilon [\%]$	plasticita mat.obrobku (dána třeba tažností) (pl.m.o.)

b) Opomenutelní činitelé:

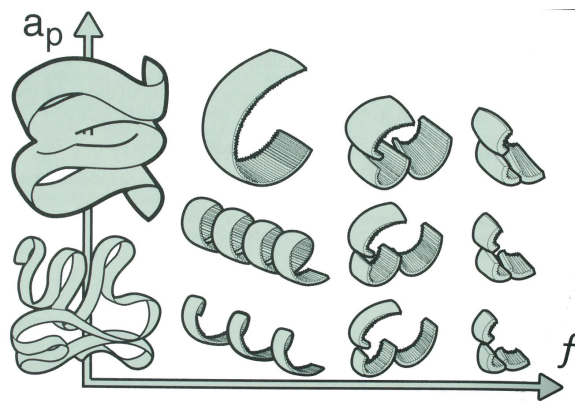
- ostatní geometrie nástroje

- chlazení, mazání řezného klínu
- stupeň neortogonalit a vázanosti řezání
- materiál nástroje
- a další: chvění, tuhost, nárůstky, legující prvky,.....atd.

Řádové vlivy neopomenutelných činitelů přirozeného utváření:

- 1) v_c → vyšší v_c → tříska plynulejší
- 2) $f(a)$ → větší $f(a)$ → tříska utvářenější
- 3) $a_p(b)$ → větší $a_p(b)$ → tříska plynulejší
- $\left[\frac{a}{b} \rightarrow \text{větší} \rightarrow \text{tříska utvářenější} \right]$
- 4) γ → větší γ → tříska plynulejší
- 5) **pl.m.o.** → větší **pl.m.o.** → tříska plynulejší

Vše s odvoláním na vliv na zónu I. plastické deformace (OMNÓ).



Obr. č.14: Tvary třísek v závislosti na posuvu a hloubce řezu.

Využití neopomenutelných činitelů spočívá ve vhodné kombinaci položek 1) - 5). Nemusí však vést vždy k požadovanému cíli (utváření $W \leq 50$).

Převažující vliv má ad 5). Dle plasticitu materiálu obrobku lze dělit materiál na:

- Tendence k plynulosti třísky (OCEL)
- Tendence k utváření třísky (ŠEDÁ LITINA)

Obecně: materiály s převážně dlouhou třískou
krátkou třískou.

Rychlostní obrábění → tendence k plynulosti třísky.

Plasticita materiálu obrobku nízká tento jev plně překryje!

Z tohoto pohledu je rychlostní obrábění, kdy se mluví o řezných rychlostech $v_c \geq 450 \text{ m/min}$, bezproblémové pro šedou litinu. Tříska zůstává přirozeně utvářená.

2.1.2 Nucené utváření třísky

Jestliže přirozené utváření selhává nebo se přímo vylučuje (vysoká plasticita a vysoké v_c) je nutné aplikovat technické prostředky:

- použití vhodného utvařeče třísek,
- stupněm neortog. a vázanosti řezání
- přerušovaným řezem
- osovým i torsním kmitáním
- (nárůstkovitostí)
- elektro-mechanicky (v elektrolytu) - TU Drážďany

2.1.2.1 Utvařeče třísek

V současné době lze ovlivnit vhodnou konstrukcí geometrie břitu zakřivení, směr, stoupání šroubovice a tvar třísky. Pro vyměnitelné břitové destičky s určitou geometrií břitu platí určitá oblast použití, s ohledem na kontrolovaný odchod třísky, stanovené posuvem a hloubkou řezu k přiřazeným materiálům obrobku. Destička pro dokončovací operace má jasně vyhraněnou geometrii špičky břitu, v porovnání s destičkou určenou

pro hrubování. V současnosti jsou upřednostňovány břitové destičky s vícefunkční geometrií, které vyhovují široké oblasti použití.

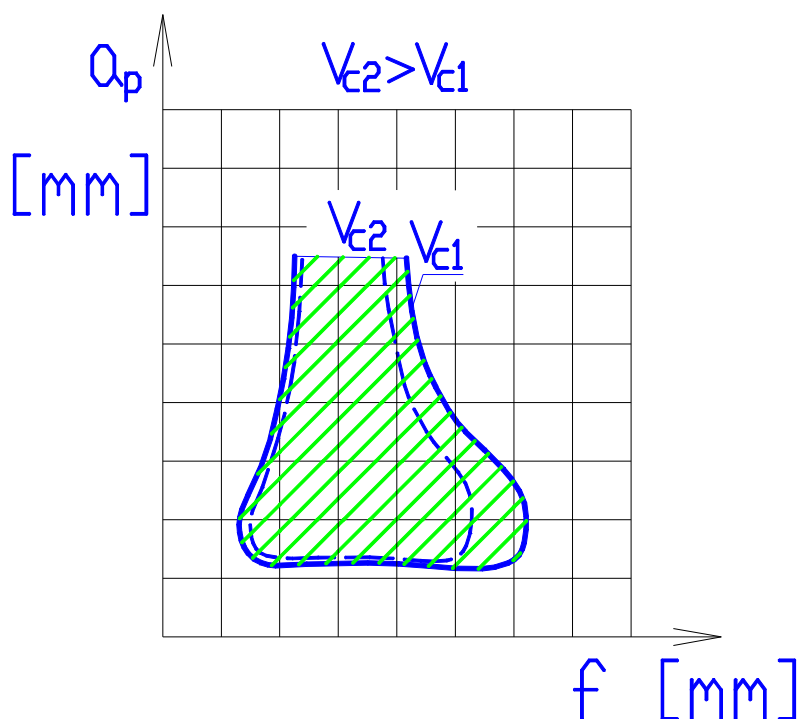
Jednotlivé typy utvařečů na čele nástroje:

- stupňové,
- žlábkové,
- příložné (utváření na čele řezného klínu),
- předlisované.

Jsou to utvařeče s částečným nebo úplným vyloučením neopomenutelných činitelů, známých z přirozeného utváření.

Tedy: Utvařeče na čele nástroje eliminují vliv neopomenutelných činitelů na utváření
→ známé z přirozeného utváření

Ze skupiny utvařečů na čele nástroje jsou v dnešní době upřednostňovány předlisované utvařeče na vyměnitelné břitové destičce (destičky ze slinutých karbidů) s příslušným grafem utváření $W = f (f, ap)$ - viz. obr. č.15, který je již standardně uváděn pro každý typ utvařeče. Dnešním moderním geometriím břitu (poměrně složitá geometrie čelní plochy břitu) předcházela celá řada broušených a lisovaných provedení utvařečů, dnes lze mluvit o zabudované kontrole třísky. Většina vyměnitelných břitových destiček má i přes negativní základní tvar pozitivní úhel čela. To slouží k dobrému utváření a snadnému odchodu. Negativní primární fazetky napomáhají ke stabilitě břitu. Velikost primární fazetky, utvařeč třísky a úhel čela mají zároveň vliv na optimální podmínky procesu obrábění a optimální tvorbu třísky, což umožňuje ovlivňovat řezné síly a teploty při obrábění. V praxi se to projeví na výkonu obrábění, trvanlivosti břitu, trvanlivosti a příkonu stroje.



Obr. č.15: Utvářecí diagram.

Vysvětlení utvářecího diagramu: Šrafovaná oblast znázorňuje oblast vhodného utváření třísky. Utvářecí diagramy jsou vždy platné pro určitý rozsah řezných rychlostí, daný nástroj a daný materiál obrobku. Hranice vhodného a nevhodného utváření třísek se mění s řeznou rychlostí. S rostoucí řeznou rychlostí se oblast vhodného utváření zmenšuje, výrazněji směrem k velkým posuvům.

Příložná varianta je nejvíce uplatňována na řezné keramice, kde stále není k dispozici klasický předlisovaný utvařec.

Renomovaní výrobci řezné keramiky řeší dosud problém cestou NEGATIVNÍ FAZETKY (zajištěna možná nejvyšší stabilita a spolehlivost při obrábění).

Problém není plně zvládnut:

$$\gamma = -20$$

$$\gamma = -30$$

$$\gamma = -20/-30$$

Tedy cestou, která v 80. letech řešila široko-pásmovost utváření z pohledu plasticity materiálu obrobku.

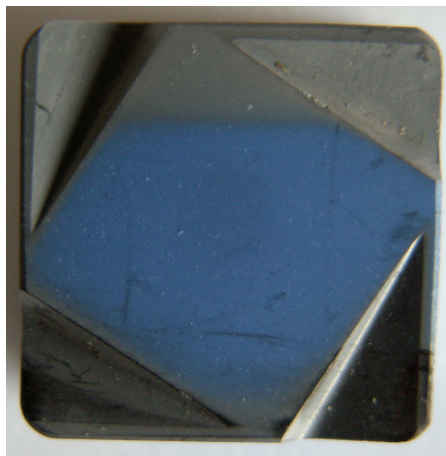
Pozn.: V roce 2003 jsem na katedře obrábění a montáže TU Liberec ve spolupráci s vedoucím diplomové práce provedl úvodní zkoušky s vybroušeným utvařečem na řezné keramice.

Řezný nástroj: dodávka firmy SAINT GOBAIN - TURNOV.

Obráběný materiál: ocel 12050.1.

Řezné rychlosti v_c v rozmezí **160 – 520m/min** (omezeny výkonem stroje)

Pro různé kombinace posuvů a hloubek řezu nedošlo ke vzniku třísky utvářené (tříska plynulá - tvar stuha) → **výsledek neuspokojivý.**



Obr. č.16: Testovaná destička dodaná firmou SAINT GOBAIN – TURNOV

2.1.2.2 Speciální metody

[dle konzultace s vedoucím diplomové práce Ing. L. Holubem, CSc.]

a) elektronicko - hydraulická soustava

b) mechanotronicko- hydraulická soustava - rozšíření ad a)

Obě soustavy realizují přerušovaný nebo pulzující řez a tím následné dělení třísky s ovladatelnými dílčími délkami elementů třísky.

ad a) **Elektronicko – hydraulická soustava** pracuje na principu buzení pulzů nestabilním multivibrátorem, spínání obvodu Zenerovou diodou, přestavování šoupátka el. magnetem.

Při realizaci ovládání JUS programovatelnými automaty (konkrétně NS 905, NS 915, NS miny - Tesla) byl obvod realizován v Boolově algebře automatu).

Limitující zde byla frekvence 12 Hz lineárního šoupátka. Toto řeší rotační šoupátko soustavy ad b).

Pozn.: Původní elektronicko - hydraulická soustava je ověřena opakovanými aplikacemi na standardních JUS. Byla zařazena do útvárové typizace.

ad b) **Mechatronicko - hydraulická soustava** rozšiřuje oblast použitelnosti původní elektronicko-hydraulické soustavy z rychlosti v_c pro: rychlořeznou ocel, slinuté karbidy cca **150m/min**, do oblasti nad **200m/min**.

Pozn.: Horní omezení z pohledu v_c není zatím stanoveno.

Principiální vysvětlení této soustavy: Jedná se o rotační šoupátko poháněné asynchronním elektromotorem s přepínáním počtu pólů (regulace otáček). Šoupátko má výměnný rotor s různým počtem přepouštěcích otvorů pro zkratový olej z obvodu posuvu. Výsledkem je pulzace posuvu hydromotoru posuvu.

2.2 Tříska pro řezné rychlosti nad 800m/min (ocel, litina)

Výše uvedené partie řešily možnosti utváření ocelové třísky v oblastech definovatelných rychlostmi v_c 200, 400, 600 m/min. Oblasti 200, 400 m/min byly zahrnuty, mimo jiné, předlisovanými a příložnými utvařeči.

Oblast zhruba pro 600 ± 100 m/min může být zahrnuta pod aplikaci spec. metod utváření.(viz. kapitola: speciální metody utváření) Je však nutno zdůraznit potřebu dalších experimentálně-teoretických prací včetně snahy předložit oblast aplikovatelnosti předlisovaných utvařečů do uvedené oblasti řezných rychlostí.

Nyní k oblasti 800m/min a výše:

Je to oblast (ocel, litina), kde se blížíme rychlosti šíření tepla v oceli, která je přibližně 900 m/min . Zde je teoreticky veškeré vzniklé teplo při obrábění odvedeno třískou (teplo do nástroje a do obrobku je minimalizováno).

Otázkou je, co udělá uvedená skutečnost s charakterem a tvarem vznikající třísky. První výsledky ze sledování třísky z této oblasti definují tzv. TŘÍSKU CYKLICKOU, (VLNOVITOU) na rozdíl od přirozeně vznikající třísky STUHOVITÉ (PLYNULÉ) z oblasti řezných rychlostí 400 - 600 m/min (pro ocel).

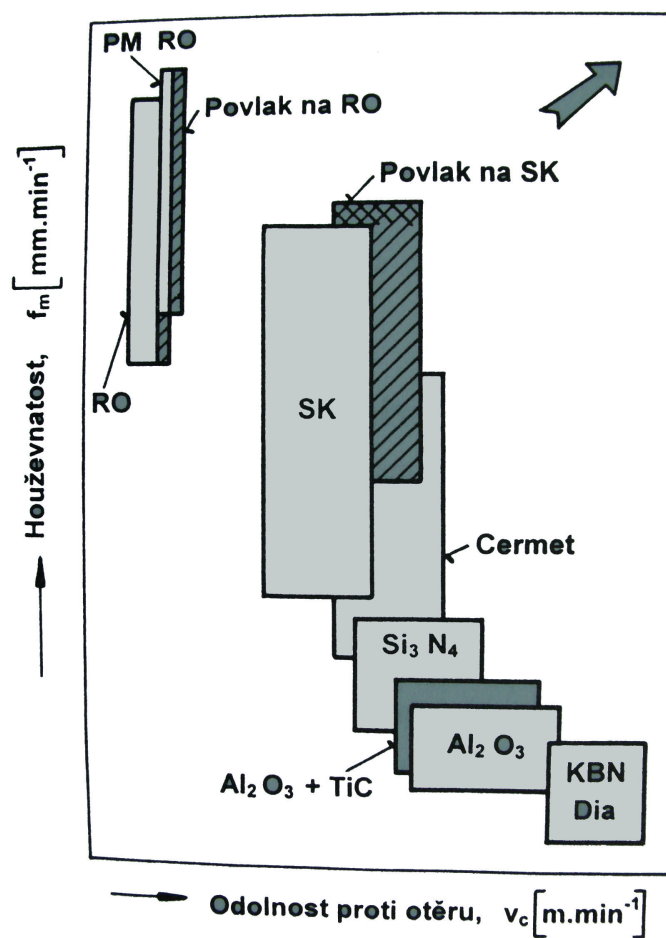
Zde v oblasti 800m/min - přistupuje příjemný jev: TŘÍSKA CYKLICKÁ (VLNOVITÁ) MÁ TENDENCI K PŘIROZENÉMU UTVÁŘENÍ - dělení na hrubší elementy, a to bez utvařečů nebo pouze s jejich podporou.

Pro tuto oblast by bylo vhodné prozkoumat využití dvojité negativní fazetky na vyměnitelné břitové destičce, známé již z 80. let.

3. PROGRESIVNÍ ŘEZNÉ MATERIÁLY S APLIKACÍ V HSC

Řezné materiály jsou výsledkem intenzivního vývoje, který probíhal především ve 20.století, zejména pak od 30. let. Bez nadsázky lze říci, že vývoj řezných materiálů patří k faktorům, které významně přispěly k výkonnosti moderního světového průmyslu. Důkazem je i fakt, že operace obráběcími nástroji, které trvaly na počátku 20. století 100 minut, zaberou v současné době méně než jednu minutu.

V současné době existují takové řezné materiály, které umožní optimalizovat skutečně každou operaci obrábění. Dosud žádný dostupný řezný materiál však není schopen zabezpečit komplexní požadavky obrábění, jak vyplývá i z následujícího obrázku:

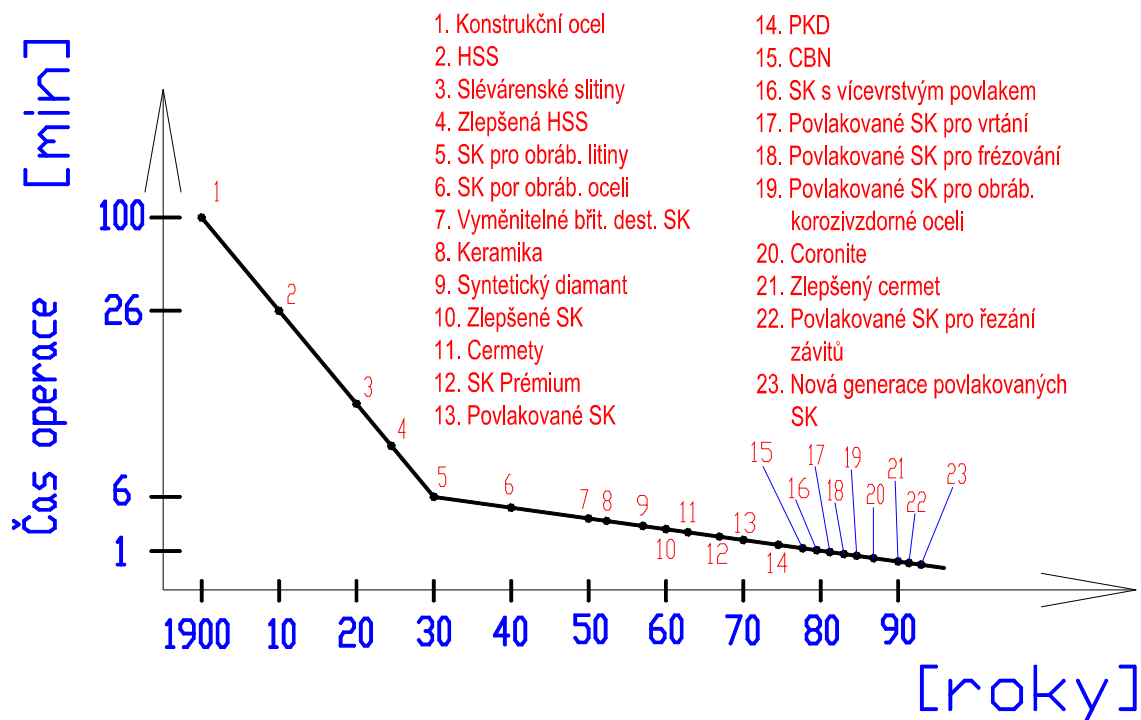


Obr. č.17: Směr vývoje progresivních řezných materiálů.

Nástrojový materiál s ideální řezivostí totiž vyžaduje:

- vysokou tvrdost a pevnost,
- vysokou houževnatost,
- chemickou stálost,
- odolnost proti teplotnímu rázu.

Dále bude uveden souhrn materiálů za posledních 100 let.



Obr. č.18: Časový průběh výkonnosti v oblasti řezných materiálů

Průlomem v oblasti obrábění byl nejprve materiál HSS. Tento materiál obrábění řeznými nástroji mnohonásobně urychlil a následné zlepšování tvrdých řezných materiálů pak obrábění velmi zjednodušilo.

3.1 Nástrojová ocel (NO)

Jedná se o oceli třídy **19** a z hlediska obsahu legur je lze rozčlenit:

- **Uhlíková nástrojová ocel** ČSN **19 1XX**, **19 2XX** rozhodující přítomnost **C** (0,5 – 1,5 %C), jenž tvoří karbidy Fe_3C = řezná složka.

- **Nízko legovaná nástrojová ocel** ČSN **19 3XX**, **19 4XX** obsah legur je do 4%. Hlavními legujícími prvky jsou **Cr**, **V**, **Mo**. Tvoří se karbidy legujících prvků + Fe_3C = řezná složka.

- **Středně legovaná nástrojová ocel** ČSN 19 5XX, 19 6XX, 19 7XX obsah legur je do 8%. Hlavními legujícími prvky jsou **Cr, V, Mo, W**. Tvoří se karbidy legujících prvků = řezná složka.

- **Vysoce legovaná nástrojová ocel** \equiv Rychlořezná ocel (RO) ČSN 19 8XX obsah legur je do 12 -18%. Hlavními legujícími prvky jsou **V, Mo, W**. Tvoří se karbidy legujících prvků = řezná složka. U klasicky vyráběných rychlořezných ocelí jsou vývojové možnosti značně vyčerpány, zejména zvyšování řezivosti. Vývojového posunu RO přinesla aplikace práškové metalurgie v 70. letech. Došlo k optimalizaci chemického složení. Některé typy RO obsahují 5 -10% **Co**, který příznivě ovlivňuje pevnostní charakteristiky za tepla a tím i výkonnost. Nazývají se vysoce výkonné a jsou označovány symbolem **HSS-E**. Nástroje z rychlořezné oceli se vyrábějí jak monolitní tak skládané. Lze jimi obrábět široké pásmo kovových a nekovových materiálů, mimo tvrdých a silně abrazivních.

- **Povlakovaná rychlořezná ocel:** Povlaky o tloušťce **4 - 5 μ m** se nanášejí metodou **PVD**. Nejčastěji je aplikován povlak nitrid titanu (**TiN**) – zlatý (cca 75%), další v pořadí četnosti použití jsou **TiAlN** a karbonitrid titanu (**TiCN**). Nanášením povlaků na RO se zvyšuje odolnost břitu proti abrazivnímu, adheznímu a chemickému opotřebení a snižuje se tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou. Typické zvýšení trvanlivosti břitu je 50 – 200%. Řeznou rychlost lze navýšit o 10 – 20% při zachování předepsané trvanlivosti. Povlakovanými nástroji z RO lze obrábět běžné oceli do pevnosti 1200MPa, některé nesnadno obrobitelné materiály, šedé litiny a neželezné kovy.

Tabulka č.1: Přehled řezných rychlostí u nástrojových ocelí

Nástrojová ocel	Průměrná teplota řezání $\theta < [^{\circ}\text{C}]$	Řezná rychlost $vc < [\text{m/min}]$
Uhlíková	200	20
nízko legovaná	350	35
středně legovaná	450	45
vysoce legovaná \equiv RO	600	50

3.2 Stellity

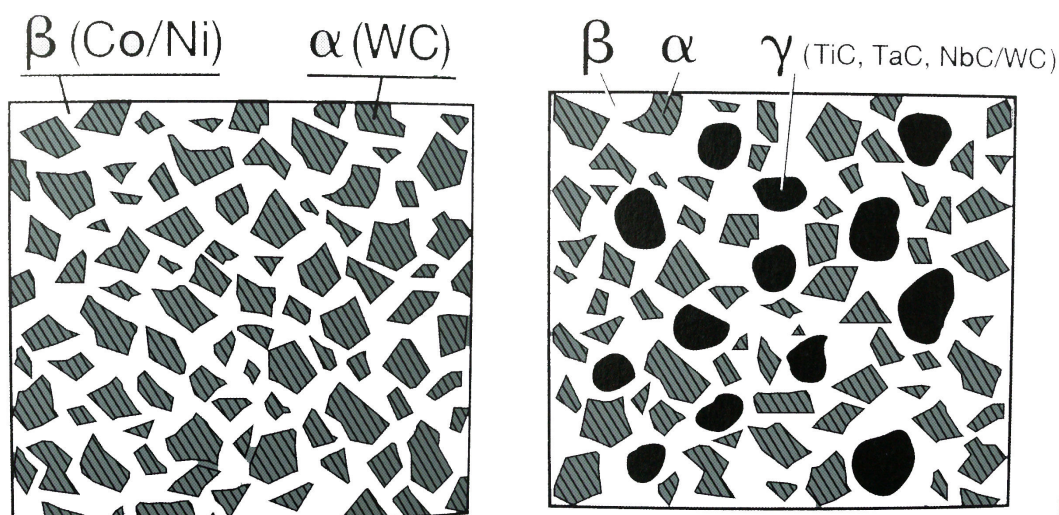
Jedná se o neželezné slitiny (**Cr**, **Co**, **W**, **C**), **Fe** je zde nečistotou. Použití pouze jako návarový materiál, s průměrnou teplotou řezání $\theta < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.3 Slinuté karbidy \equiv SK

SK je též znám pod názvem spékaný kov, byl vyvinut ve 20. letech v Německu. Zavedení SK do výroby vedlo k mnohonásobnému zvýšení řezné rychlosti oproti nástrojům z RO a též trvanlivosti.

Již z názvu je patrné, že se jedná o řezný materiál obsahující tvrdé částice karbidu. Zpočátku byly SK dvousložkové. První složka byla karbid wolframu (**WC**) s funkcí tvrdého materiálu a druhá složka byla kobalt (**Co**) jako kovové pojivo. Došlo ke zlepšení při obrábění hliníku a šedé litiny, ale k nepatrnému u ocelí z důvodu rychlého vymílání.

Tato skutečnost vedla k intenzivnímu výzkumu SK. Vznikly druhy SK, jejichž princip je na karbidu wolframu, jako jedné fázi, kubických karbidů titanu, tantalu a niobu (**TiC**, **TaC**, **NbC**), jako druhé fázi a kobaltového pojiva, které představovalo třetí fázi. Výše zmíněné kubické karbidy zlepšují chemickou stabilitu a snižují výskyt tepelných trhlin při obrábění ocelí. Uvedené karbidy mohou i bez kovového pojiva tvořit slinuté karbidy, neboť jsou navzájem rozpustné. Velikost tvrdých částic se v pohybuje v rozmezí 0,8 - 10 μm , běžný objem pojiva je v rozmezí 5 – 40%.

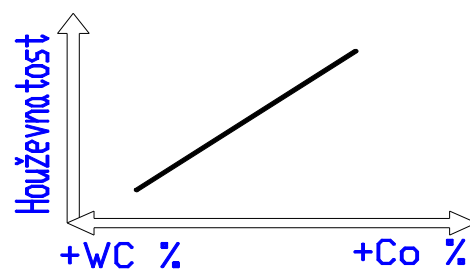
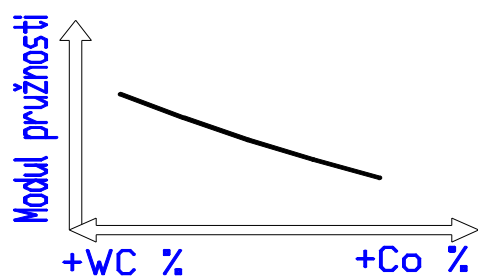
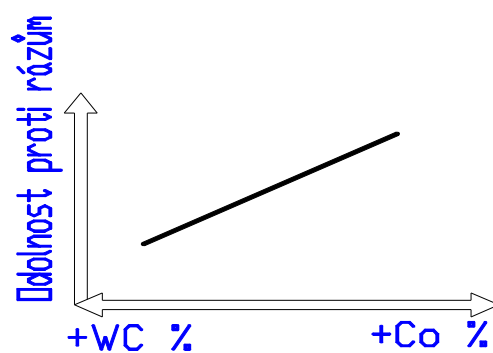
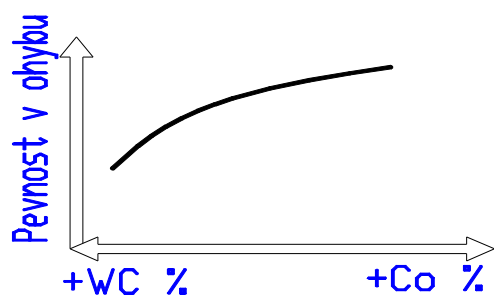
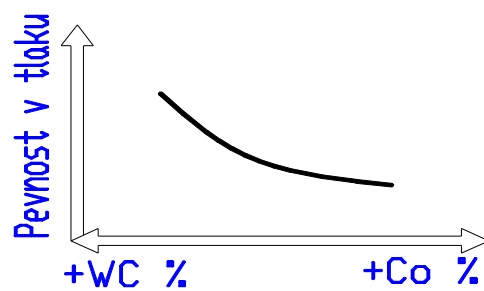
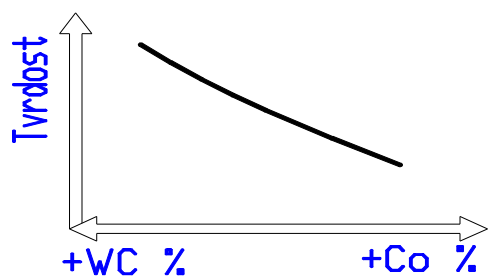


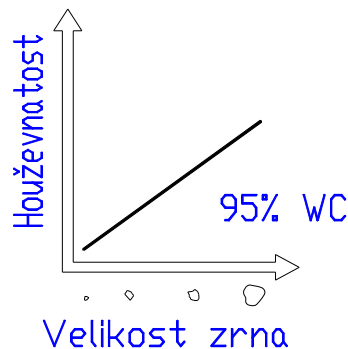
Obr. č. 19: Struktura dvou a trojsložkového slinutého karbidu.

Mechanické vlastnosti vyráběných SK se značně liší, především tvrdost a houževnatost. Tyto vlastnosti se odvíjejí z těchto faktorů:

- typ a velikost tvrdých částic
- druh a podíl kovového pojiva
- kvalita výroby
- výrobní technologie

Z níže uvedených grafů vyplývá, že vyšší podíl tvrdých částic, z důvodů jejich vyšší tvrdosti a pevnosti v tlaku, má za následek u SK vyšší odolnost proti opotřebení. Na druhou stranu větší podíl kovového pojiva uděluje houževnatost. Pevnost v ohybu je nepřímo úměrná tvrdosti a u slinutých karbidů roste s větším podílem kovového pojiva. Také změnou velikosti zrn tvrdých karbidotvorných částic lze dosáhnout jisté kombinace tvrdosti versus houževnatosti. Velká zrna způsobují houževnatost a malá zrna na straně druhé relativně vysokou tvrdost.



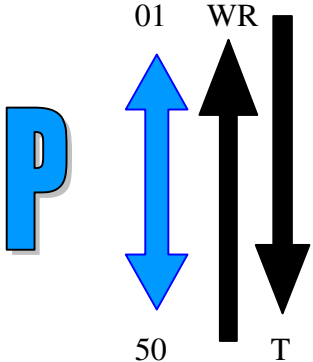
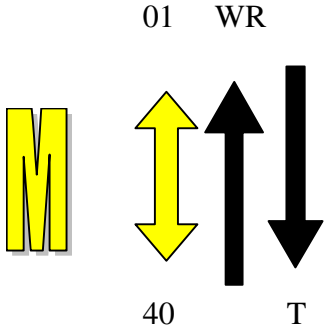
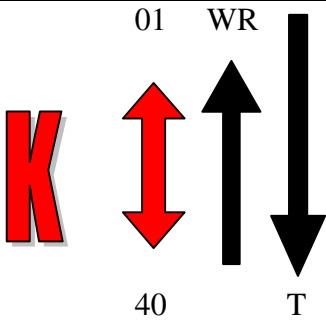


Obr. č.20: Grafy závislostí mechanických vlastností na struktuře SK

K dalším důležitým vlastnostem slinutých karbidů patří chemická afinita a tepelná vodivost. Chemická afinita nemá však u většiny materiálů obrobků, zejména při vysokých teplotách, tak značný vliv, aby mohla použitelnost slinutých karbidů omezit. Tepelná vodivost je vysoká a při použití vhodného povlaku dochází i ke zvýšení odolnosti proti oxidačnímu opotřebení.

Dlouhodobý vývoj slinutých karbidů zajistil optimální chemické složení, zvýšení výkonnosti a spolehlivosti, pevnostních charakteristik a houževnatosti. Vyvážené vlastnosti povlakovaných i nepovlakovaných slinutých karbidů jim vydobily prvenství jako rezného nástroje pro obrábění většiny kovů. Významné postavení pravděpodobně zůstane i nadále zachováno, i když některé aplikace jsou v současnosti realizovány tvrdými a super tvrdými materiály. Pro nejširší nasazení byli vyvinuty slinuté karbidy se specifickými vlastnostmi. Z důvodů popsání hrubých rysů určitého druhu slinutých karbidů, byl pro ně vyvinut klasifikační systém ISO. Tento systém tvoří tři základní skupiny členěné dle materiálu. Každá skupina obsahuje navíc čísla, která udávají rozdílné požadavky při obrábění. Klasifikace ISO je výhradně pro slinuté karbidy a nezahrnuje ostatní rezné materiály.

Tabulka č.2: klasifikace ISO

Skupina ISO	Použití	Základní složení
	materiály tvořící dlouhou třísku: ocel, ocelolitina, korozivzdorná ocel, temperovaná litina.....	WC + TiC + Co
	obrábění austenitických korozivzdorných ocelí, žáruvzdorných materiálů, manganových ocelí, legovaných druhů litin.....	WC + TiC + + TaC/NbC +Co
	materiály tvořící krátkou třísku: šedá litina, kalená ocel, neželezné materiály – hliník, bronzy, plasty.....	WC + Co

Ze slinutých karbidů se v převážné míře vyrábějí vyměnitelné břitové destičky, které jsou připraveny přesným lisováním nebo se dále brousí, a různé řezné elementy. V malém množství jsou destičky určeny pro pájené nástroje, které mají lepší odvod tepla z místa řezu, jsou přesnější, ale na druhé straně ekonomicky náročnější oproti skládaným nástrojům.

Slinuté karbidy lze také využít jako podkladový materiál pro super tvrdé materiály. Zároveň roste i počet nástrojů, které byly dříve vyráběny z rychlořezné oceli

(např. monolitní či skládané vrtáky, konstrukční materiály pro štíhlé vyvrtávací tyče) a dnes se vyrábějí ze slinutých karbidů.

3.4 Povlakované slinuté karbidy

Povlakované slinuté karbidy byly uvedeny na trh koncem 60. let. Tenký povlak měl tloušťku jen několik μm , ale i tak to opětovně vedlo ke zvýšení výkonnosti rezného nástroje ze SK. Došlo k podstatnému nárůstu rezné rychlosti (u posledních povlaků se jedná o 200 – 300% oproti nepovlakovaným SK) a trvanlivosti břítu. I když byl nástroj částečně opotřeben, přetrvával efekt povlaku nadále a při obrábění ocelí bránil opotřebení nástroje na čele (ve tvaru žlábků) a na hřbetě. Použití vyšší rezné rychlosti i posuvů bylo možné díky vyšší tepelné odolnosti.

Od 60. let je nastartován vývoj čtyř typů povlaků a optimalizace podkladového SK. Povlaky jsou většinou nanášeny vysokoteplotním procesem CVD. PVD procesy nanášení jsou upřednostňovány pro výměnné destičky potřebující ostrý břit nebo vysokou pevnost při použití pozitivní geometrie, dále pak monolitní popř. pájené nástroje.

Pro povlakování se používají :

- a) karbid titanu (**TiC**) – zbarvení šedé,
- b) nitrid titanu (**TiN**) – zlaté zbarvení,
- c) oxid hlinitý (**Al₂O₃**) – zbarven černě,
- d) karbonitrid titanu (**TiCN**) – barva transparentní.

V poslední době je realizován i povlak diamantový o tloušťce 5-8 μm nanášený plazmovým procesem CVD. Aplikuje se na existující destičky se složitými utvařeči. V porovnání s tvarově jednoduššími destičkami osazenými kompakty z polykrystalického diamantu však vycházejí levněji.

Oxid hlinitý a karbid titanu vytváří velmi tvrdé vrstvy zaručující odolnost proti opotřebení a chemickou neutralitu. Nitrid titanu není sice tak tvrdý, ale má příznivý vliv na koeficient tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou a rovněž zvyšuje odolnost proti opotřebení ve tvaru žlábků na čele nástroje. Karbonitrid titanu se vyznačuje dobrou přilnavostí a zároveň dobrou odolností proti opotřebení. Nanášené vrstvy mají nízkou tepelnou vodivost a z toho plyne nižší tepelné namáhání řezného nástroje.

V současné době se jednofázové povlaky na bázi karbidu titanu, nitridu titanu nebo oxidu hlinitého využívají jen výjimečně. Většina nanášených povlaků je vícevrstvých. Vrstvy mohou být tvořeny jednotlivými fázemi nebo jednou fází s rozdílnou zrnitostí struktury:

- dvě vrstvy s rozdílnou zrnitostí **TiC + Al₂O₃**
- **TiC + TiCN + TiN + Al₂O₃**
- **TiC + Al₂O₃ + TiN**

Na první vrstvu nanesenou na základní substrát SK se z důvodů dobré přilnavosti používá oxid hlinitý. Po této vrstvě následují další vrstvy a sice nitrid titanu nebo oxid hlinitý podle uvažované oblasti použití řezného nástroje. Existují povlaky, které jsou tvořeny až z 15 vrstev. Přednosti vícevrstvých povlaků jsou následující:

- zlepšení řezných charakteristik bříty vlivem kombinace vlastností různých povlaků,
- univerzálnější použití z hlediska výrobce a spotřebitele.

Celková tloušťka všech povlaků by se měla pohybovat v rozmezí 8 – 12 μm pro plynulý řez a 4 – 6 μm pro přerušovaný řez. Jen výjimečně se používají tlustší vrstvy, neboť s rostoucí tloušťkou roste křehkost a sklon k odlupování povlaků.

Zároveň podkladový SK a především jeho povrchová vrstva mají hlavní vliv na chování povlakované břitové destičky v provozu. Poslední generace SK využívají při výrobě „gradientní slinování“, jenž umožňuje řízení rozdílného rozložení pojiva

v podpovrchových vrstvách. Vyšší obsah pojiva v podpovrchových vrstvách zvyšuje houževnatost bříty.

Povlakované výměnné destičky ze SK jsou přednostně doporučovány pro téměř všechny soustružnické operace (odhaduje se více jak 75% použití v soustružnických aplikacích), větší část vrtacích operací a frézování (odhad činí kolem 40 %).

3.5 Cermety

Cermety jsou nazývány všechny kovokeramické materiály. Tvrdé složky jsou tvořeny karbidem titanu, karbonitridem titanu nebo nitridem titanu a rovněž i karbidem wolframu. Tyto karbidy jsou v kovovém pojivu (**Ni** - nikl, **Mo** – molybden, **Co** – kobalt).

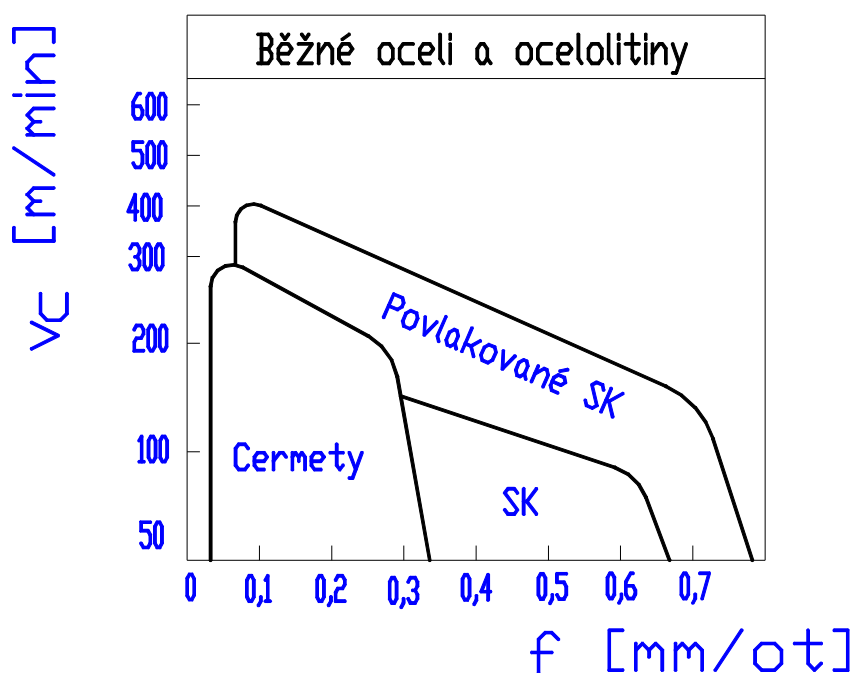
Název vznikl spojením slov vycházejícím z jejich struktury, keramických tvrdých částic a kovového pojiva. Nelze tedy jednoznačně říci, zda cermet je SK nebo naopak. V praxi lze cermety považovat za SK na bázi titanu (SK jsou na bázi karbidu wolframu). První druhy byly známy již ve 20. letech 20. století, ale v tomto období byly velmi křehké a špatně vyrobitelné. Teprve přidáním molybdenu ve formě karbidu molybdenu (**Mo₂C**) a dokonalejší technologií výroby vznikly první použitelné řezné materiály. Ke zlepšení houževnatosti došlo až po přidání většího množství nitridu titanu a pojiva. Až nyní však získávají cermety na oblibě díky lepší stabilitě, vysoké řezné rychlosti a nižším přídávům na obrábění.

Mezi pozitivní vlastnosti cermetů patří vysoká odolnost proti opotřebení hřbetu a opotřebení čela ve tvaru žlábků, vysoká chemická stabilita a pevnost za tepla, malý sklon k oxidačnímu opotřebení a malý sklon k vytvoření nárůstku. Díky pomalému průběhu opotřebení mají cermetové břitové destičky vysokou trvanlivost a při obrábění jsou dosahovány výborné jakosti povrchu obrobku a přesnosti obráběných dílů. Jemnozrnné struktury např. **TiC + TiN + Ni/Mo** jsou díky zlepšené odolnosti proti

tepelnému šoku vhodné i pro některé frézařské operace. Stávající cermety jsou vhodné pro obrábění ocelí, ocelolitin a do jisté míry i litin.

Novinkou jsou cermety s postupně měnícími se vlastnostmi od houževnatého jádra po tvrdou povrchovou vrstvu získané speciálním procesem slinování. Taková kombinace poskytuje řezný materiál vhodný pro jemné obrábění vysokými řeznými rychlostmi.

Cermety jsou též nabízeny i v povlakované podobě. Povlaky se převážně nanáší metodou PVD. Umožňují zvýšit řeznou rychlost nebo trvanlivost břitu. Příznivě ovlivňují opotřebení a působí protinárůstkově.



Obr. č.21: Aplikační oblasti cermetů, nepovlakovaných a povlakovaných SK.

3.6 Coronite

Materiál Coronite je zcela novým řezným materiálem, který vyplnil do té doby existující mezeru v oblasti řezných materiálů mezi rychlořeznou ocelí a slinutými karbidy. Navíc tyto materiály svými schopnostmi značně převyšují produktivitu obrábění realizovaného nástroji z rychlořezné oceli.

Důležité vlastnosti materiálu Coronite jsou určeny velikostí zrna, výrobní technologií a postupy při výrobě malého zrna nitridu titanu (TiN). V porovnání s materiály ze SK a RO, u nichž je velikost zrn 1-10 μ m, je rozměr zrn Coronite pouhých 0,1 μ m. Speciální technologií jsou malá zrna nitridu titanu rovnoměrně rozptýlována do tepelně zpracovávané základní fáze oceli. Obsah tvrdých částic z celkového objemu tvoří zhruba 50 % a je po právu řazen mezi tvrdé materiály. Vlastnosti Coronite se dají do značné míry ovlivňovat měnícím se podílem legujících prvků (především uhlíku) a speciálním tepelným zpracováním. Tím je možné vytvářet nové varianty vlastností materiálu Coronite. Fázové přeměny jež známe z rovnovážného diagramu železo – uhlík se vlivem velkého podílu jemnozrného nitridu titanu nevytváří. Kombinací rovnoměrného rozptýlení zrn ve velkém objemu a malou velikostí zrna se zvyšuje odolnost proti opotřebení v celém průřezu. Největší vliv na kladné vlastnosti mají tvrdé jemnozrné částice, které umožňují vybrousit ostrý břit s dlouhou trvanlivostí a ostrostí po celou dobu procesu opotřebování břitové destičky. Přičemž dochází i k určitému samoostřicímu efektu, který u SK a rychlořezné oceli není. Dochází ke zlepšení jakosti obrobeného povrchu, za kterou stojí právě jemnozrná struktura. Běžně dosahovaná drsnost je **R_a = 1 μ m**. Nejdůležitější tvrdou složkou obsaženou v Coronite je nitrid titanu, který má vysokou odolnost proti opotřebení, nepatrný sklon k tvorbě nárůstka a je chemicky velmi stabilní.

Použití tohoto řezného materiálu je v první řadě zaměřeno na stopkové frézy do průměru 20mm, které jsou vhodné pro hrubovací a dokončovací operace při výrobě dutin a profilů. Výrobní technologie Coronite používá moderní technologie sliňování a nanášení povlaků. Stopkové kopírovací frézy s půlkulatým břitem jsou vyráběny z plného řezného materiálu Coronite. Ostatní frézy není nutné vyrábět z plného průřezu tohoto řezného materiálu. Tyto frézy se skládají ze tří částí:

- 1) Z ocelového jádra, které je tvořeno buď rychlořeznou nebo pružinovou ocelí udělující vysokou houževnatost.
- 2) Z vrstvy materiálu Coronite o tloušťce kolem 15% průměru frézy.
- 3) Z povlaku nitridu titanu nebo karbonitridu titanu o tloušťce 2 μ m naneseného metodou PVD. U Coronite je povlak neodmyslitelnou součástí ještě zvyšující odolnost proti opotřebení na hřbetě a čele nástroje. Díky složení substrátu dochází ke vzniku neobyčejně pevné vazby mezi nitridem titanu v substrátu a nitridem titanu v povlaku.

Vzniklá vazba snižuje odlupování vrstev povlaku. Zároveň povlak a substrát mají obdobné součinitele roztažnosti.



Obr. č.22: Nástroj z řezného materiálu Coronite.

V Coronite se slučují vlastnosti SK a RO jako je houževnatost a odolnost proti opotřebení. Oproti rychlořezné oceli lze mnohonásobně zvýšit řeznou rychlost. Navíc tyto nástroje mají lepší tvrdost za tepla, delší trvanlivost břitu, vyšší spolehlivost břitu a již zmíněné dosahované jakosti obroběného povrchu.

Coronite byl vyvinut pro obrábění především oceli, ale také lze aplikovat na obrábění různých lehkých neželezných kovů, slitin titanu a šedé litiny.

3.7 Keramika

Tento název je souhrnný pro několik řezných materiálů s odlišným chemickým složením a mikrostrukturou. Nástroje z keramiky na bázi oxidu hlinitého byly používány již na počátku minulého století. Tyto druhy byly velmi křehké a s ohledem na špatně zvladatelnou technologii výroby a chybná doporučení jejich použití vedly ke snížení trvanlivosti na tak krátkou dobu, že byly zcela nepoužitelné v reálném procesu obrábění. Od té doby se mnohé změnilo a vyměnitelné břitové destičky z keramiky se s těmi původními nedají vůbec srovnávat. Také došlo ke zlepšení obráběcích strojů a technologie obrábění, což umožňuje využití potenciálu řezné keramiky, především nárůst výkonnosti výroby. I když se jedná o mnohostranně využitelný materiál, jeho použití zůstává omezeno na obrábění šedé litiny, kalených

ocelí, žáruvzdorných slitin, tvárné litiny a některých druhů ocelí. Keramické řezné materiály jsou charakteristické těmito vlastnostmi:

- velká tvrdost i za vysokých teplot,
- dobrá chemická odolnost,
- vysoká trvanlivost břitu nástroje,
- využitelná vysoká řezná rychlost,
- nízká tepelná vodivost,
- velký objem odebraného materiálu.

Na druhou stranu jsou tyto materiály více náchylné na vibrace a z toho plynou vyšší nároky na celou soustavu **S-N-O-P**.

Vlastnosti jednotlivých druhů keramiky lze značně ovlivňovat procesem zpracování, přípravou výchozí suroviny (= prášku), přísadami a velikostí zrn.

Řeznou keramiku lze rozdělit na dvě základní skupiny:

a) Na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3), jenž se nadále člení na:

- čistou oxidickou,
- směsnou,
- vystuženou.

b) Na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4) = neoxidická keramika.

Čistá oxidická keramika se vyznačuje relativně nízkou pevností, houževnatostí a také malou tepelnou vodivostí. Nepříliš vhodné vlastnosti pro obrábění kovů zapříčiňují vylamování břitu při nepříznivých podmínkách obrábění. Zlepšení uvedených vlastností je možné přidáním malého množství oxidu zirkoničitého (ZrO_2). Zirkon zvyšuje houževnatost. Jakkoliv malá porezita má za následek snížení výkonu. Barva čisté keramiky je:

- bílá – lisování za studena,
- šedá – lisování za tepla.

Směsná keramika na bázi oxidu hlinitého – přidáním kovové fáze karbidu titanu a nitridu titanu v množství 20 – 40% vede ke zvýšení odolnosti proti tepelnému šoku a náchylnosti k lomu. Barva této keramiky je černá.

Vystužená keramika na bázi oxidu hlinitého je relativně novým materiálem. Je zpevněna tenkými a velmi pevnými vlákny whiskery. Vlákná jsou o průměru 1 μ m a sestávají z karbidu křemíku. Vlivem tohoto vyztužení podstatně roste houževnatost, pevnost v tahu, odolnost proti tepelnému šoku, tvrdost za tepla a odolnost proti opotřebení. Vyvážené vlastnosti ji předurčují k obrábění žáruvzdorných slitin, kalených ocelí, šedé litiny a zejména při obrábění přerušovaným řezem.

Neoxidická keramika je na bázi nitridu křemíku a zachovává si vysokou tvrdost za tepla. Oproti oxidické keramice je houževnatější, ale naopak má nižší chemickou stálost při obrábění ocelí. Bezkonkurenční použití má při obrábění šedé litiny s velkým úběrem materiálu.

Neoxidická keramika je tvořena krystaly nitridu křemíku uloženého v pojivu. Nitrid křemíku se v jednofázové podobě obtížně zhutňuje. Keramické legování vytvořilo tuhé roztoky oxidů v mřížce nitridu křemíku, praktickou aplikaci doznaly tzv. sialony (**Si-Al-O-N**).

Keramické výměnné břitové destičky mají jednodušší tvar než ze SK vlivem vrubové houževnatosti. Z tohoto důvodu je utváření třísky řešeno příložnými destičkami ze SK.

Rovněž keramické destičky lze opatřit povlakem, většinou nanášeným metodou CVD. Zvyšují chemickou odolnost a odolnost proti teplotním rázům.

Oblasti vhodného využití řezné keramiky:

a) Obrábění šedé litiny - dobré výsledky vykazuje čistá oxidická keramika při hrubovacích a dokončovacích operacích. Keramika na bázi nitridu křemíku při obrábění přerušovaným řezem a měnících se hloubkách řezu.

b) Obrábění žáruvzdorných slitin – dříve tyto materiály bylo možné obrábět pouze nepovlakovaným SK. Řezná keramika umožňuje zvýšení řezné rychlosti i při zachování delší trvanlivosti břitu řezného nástroje.

c) Kalená ocel a tvrdé druhy litiny – k obrábění těchto materiálů se používá směsná či vyztužená keramika. Soustružení kalených ocelí se s úspěchem používá místo dokončovacích operací broušení. Při obrábění těchto materiálů došlo k nárůstu produktivity vlivem nasazení řezné keramiky u níž je dobrá odolnost proti opotřebení a chemická stálost. Při obrábění tvrdých litin, které obsahují tvrdé karbidy, se do popředí dostává vlastnost řezné keramiky odolávat abrazivnímu opotřebení.

Tabulka č.3: Skupiny materiálů vhodné pro obrábění řeznou keramikou, hlavní (**x**), možné (**o**)

Materiál obrobku	Druh řezné keramiky			
	čistá oxidická Al_2O_3 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$	směsná $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$	vyztužená $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$	neoxidická Si_3N_4
Litiny	x	x		x
Zušlechťené oceli a tvrzené litiny		x	x	o
Žáruvzdorné slitiny		x	x	o
Žárupevné slitiny			x	
Oceli	o	o		

3.8 Kubický nitrid bóru – CBN

Kubický nitrid bóru je velice tvrdý materiál. V tvrdosti ho překonává již jen diamant. V přírodní formě se nevyskytuje a je vyráběn synteticky. Je to poměrně mladý řezný materiál, který byl zaveden v 50. letech 20. století. Výraznější uplatnění našel až v 70. letech 20. století. Společně s diamantem jsou také označovány jako **supertvrdé** řezné materiály. Technologie výroby kubického nitridu bóru a diamantu je analogická. V prvním stádiu dochází k transformaci výchozího materiálu do částic a poté zhutňování do kompakťů za vysokých teplot (kolem 1500 °C) a tlacích (kolem 6000

MPa). Nejen technickou ale i ekonomickou náročnost výroby supertvrdých materiálů zvládlo pouze pár výrobců z celého světa.

Kubický nitrid bóru má extrémní tvrdost, vysokou tvrdost za tepla i kolem teplot 2000 °C, velkou odolnost proti abrazivnímu opotřebení a chemickou stabilitu. Oproti keramice je houževnatější a tvrdší, ale naopak má nižší chemickou a tepelnou odolnost.

Vlastnosti kubického nitridu bóru lze ovlivňovat při procesu výroby změnou velikosti krystalů, množstvím a typem přísadových tvrdých částic (karbidy, nitridy), druhem a podílem pojiva. Vysoký obsah náhodně orientovaných krystalů kubického nitridu bóru má vysokou houževnatost a nejvyšší tvrdost (krystaly mohou být zhutněny i bez pojiva).

Nižší obsah CBN vázaného keramickým pojivem (s možným přidáním jiných tvrdých částic) se vyznačuje větší odolností proti opotřebení a chemickou stabilitou. Vzniklé břitové destičky jsou dvojího provedení. Buď jako monolitní nebo jsou přislinované na podkladovou destičku ze SK. Druhá varianta je oproti té první cenově výhodnější, houževnatější a odolnější proti rázu.

Důležitou podmínkou pro plné využití tohoto řezného nástroje je kvalitní zpracování ostří, většinou se zápornou fazetkou a negativní geometrií břitu. Zhotovená fazetka na břitu nástroje zabraňuje mikroskopickému vydrolování.

Hlavním předpokladem použití břitové destičky z CBN je dostatečně stabilní a výkonný stroj. Předpoklad vychází z relativně vysokých řezných sil způsobených částečně použitím negativní geometrie břitu, obráběným tvrdým materiálem a vysokými třecími silami při obrábění.

Oblast obrábění nástroji z CBN pokrývá ocelové výkovky, kalenou ocel, litinu, povrchově kalené obrobky, žáruvzdorné slitiny a slinované materiály na bázi kobaltu a železa.

Velmi vhodné je nasazení břitové destičky z CBN při obrábění kalených ocelí na čisto, z důvodu vysoké přesnosti rozměrů ($\pm 0,01\text{mm}$) a jakosti obrobeného povrchu ($R_a = 0,3\mu\text{m}$).

CBN by se měl používat zásadně na materiály s **tvrdostí přes 48 HRC**. Zde platí pravidlo, **čím tvrdší materiál tím nižší opotřebení břitové destičky**.

Oblasti použití CBN a keramiky se překrývají. Je proto důležité před vlastním výběrem jednoho či druhého řezného nástroje provést rozbor na základě provedených zkoušek trvanlivosti břitu. CBN je oproti keramice tvrdší, otěruvzdornější, ale dražší.

3.9 Diamanty

Diamant je nejtvrdším známým přírodním materiálem, jehož tvrdosti téměř dosahuje syntetický polykrystalický diamant (zhruba 80%). Dalšími známými průmyslovými diamanty jsou syntetický monokrystal a fólie získané chemickou depozicí z plynné fáze. Diamant je jednou krystalickou modifikací uhlíku (C), krystalizující v kubické soustavě. Druhá modifikace je čistý grafit, který krystalizuje v hexagonální soustavě. Krystal diamantu je tvořen dvěma vzájemně prostoupenými plošně centrovanými krychlovými mřížkami, které jsou navzájem posunuty o $\frac{1}{4}$ tělesové úhlopříčky.

Nejširší uplatnění má polykrystalický diamant, který má izotropní vlastnosti oproti monokrystalu. Při výrobě lze vlastnosti kompakťů ovlivňovat velikostí krystalů a typem vazby (kov, keramika).

Polykrystalický diamant je mimořádně tvrdý, odolává vysokému abrazivnímu opotřebení. Jemné krystaly jsou v pojivu nahodile orientovány, což nevytváří místa možného zdroje lomu, tvrdost a odolnost je ve všech směrech stejná.

Břity z polykrystalického diamantu jsou připájeny na špičky břitových destiček ze SK, které jim udílí pevnost a odolnost proti rázovým a teplotním šokům.

Pro úspěšné aplikování je hlavním předpokladem ostrý břit s pozitivní geometrií. Přestřování nástroje z polykrystalického diamantu by bylo ekonomicky náročné, proto se ani neprovádí (břitové destičky na jedno použití).

Polykrystalický diamant je od počátku 70. let přednostně nasazován na soustružení, vrtání a frézování abrazivních materiálů slitin hliníku s křemíkem s vysokým obsahem křemíku (Si), SK, keramiky, slitin mědi, kamene, tvrdé pryže, kompozitů a plastů, slitin hořčíku, slitin zinku a olova.

Pro polykrystalický diamant platí jistá omezení: teploty v oblasti řezání musí být udrženy pod 600°C, není vhodný k obrábění houževnatých materiálů s vysokou pevností a díky své afinitě k železu ani k obrábění železných materiálů.

Díky novým poznatkům lze břitové destičky polykrystalického diamantu využít i k obrábění litiny. Teplota řezání však musí být udržena pod kritickou hodnotou 700°C. Pod touto teplotou nedochází ke grafitizaci a uhlík z nástrojového materiálu nereaguje s materiálem obrobku. Pro dodržení tohoto procesu je nutná jistá úprava břitu, přesně řízené chlazení a správná volba řezných podmínek. To umožní zachování hlavních vlastností polykrystalického diamantu.

Přírodní diamant je díky své vysoké ceně používán pouze na speciální operace. Přednostně je nasazován při velmi přesném obrábění s vysokým požadavkem na jakost obrobené plochy, neboť z tohoto materiálu lze zhotovit poloměr ostří do 10nm. Dnes se tímto způsobem vyrábějí rozměrná hliníková zrcadla pro kosmické využití.

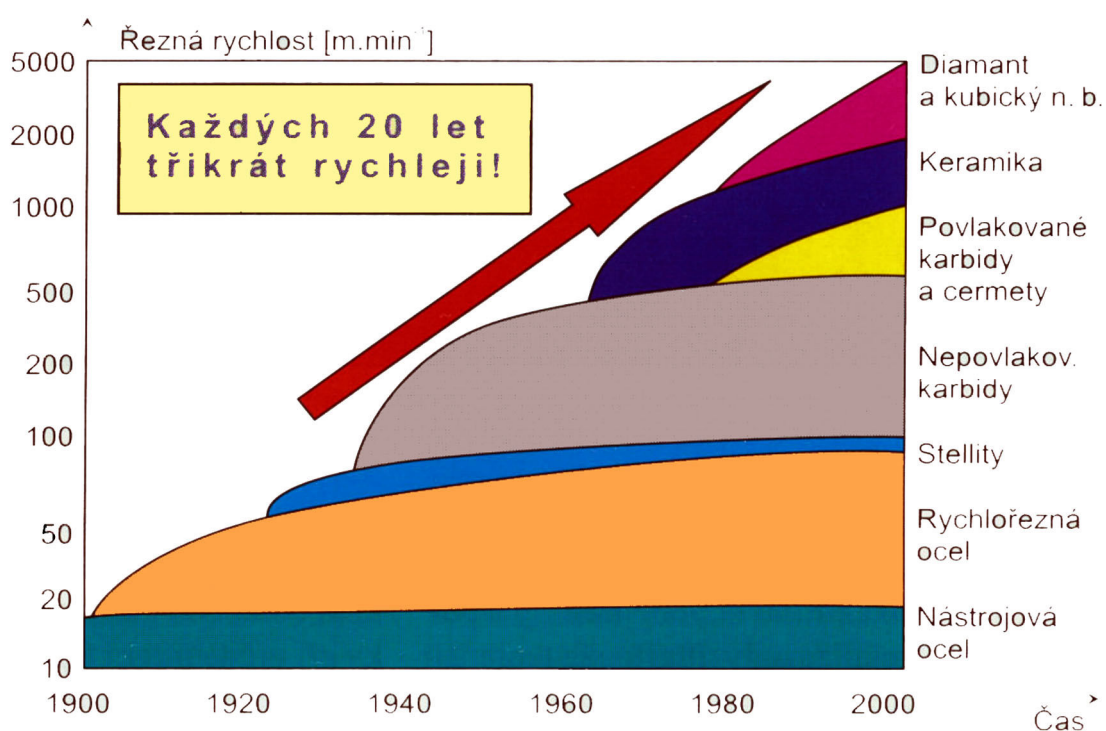
Syntetický monokrystal diamantu je v posledních letech rovněž používán. I přes vysoký obsah nečistot dusíku má obdobné vlastnosti jako přírodní diamant. Vhodné použití tohoto řezného materiálu je při přesném obrábění neželezných a nekovových materiálů. Není vhodný k obrábění velmi tvrdých materiálů vlivem přítomnosti štěpných rovin.

S ohledem na vysokou křehkost diamantu musí být při obrábění zajištěny stabilní podmínky, dostatečně tuhé nástroje a stroje a vysoká řezná rychlost. Pro soustružnické

operace vybíráme držák pokud možno s co největším průřezem a dodržujeme minimální vyložení nástroje. Při frézování používáme nižší řezné rychlosti a posuvy a minimalizujeme axiální a radiální házení.

Tabulka č.4: Přehled řezných rychlostí pro uvedené řezné nástroje.

Řezný materiál	Průměrná teplota řezání $\theta < [^{\circ}\text{C}]$	Řezná rychlost $v_c [\text{m/min}]$
SK pájené	900	≤ 90
SK upínané za otvor	1000	$< 130 - 170 (200)$
SK povlakované	1400	< 450
CORONITE	800	< 80
Řezná keramika	1400 - 1600	$\leq 600 - 800$
Řezná keramika povlakovaná	1600	$\approx 800 - 900$
CBN	1600 - 1700	≤ 1000
Polykrystalický diamant	1800	> 1000



Obr. č.23: Vývoj řezných rychlostí řezného materiálu.

Tabulka č.5: Značení tvrdých řezných materiálů dle ČSN ISO 513/1994

Symbol	Skupina řezných materiálů
HW	Nepovlakované SK s primárním obsahem WC
HT	Nepovlakované materiály s primárním obsahem TiC nebo TiN (= cermety)
HC	Povlakované SK a cermety
CA	Oxidická keramika Al₂O₃
CM	Směsná keramika
CN	Neoxidická keramika Si₃N₄
CC	Povlakovaná keramika
DD	Polykrystalický diamant
BN	Polykrystalický KBN

4. VÝKONOVÁ OPTIMALIZACE U SLINUTÝCH KARBIDŮ, POVLAKOVANÝCH SK, KERAMIKY

Aplikace rychlostního obrábění předpokládá existenci progresivních řezných materiálů, které zachovávají svou řezivost (trvanlivost břitu) i při vysokém tepelném a teplotním zatížení řezného klínu. A tím vyvstává požadavek řešit úkoly spojené s výkonovou optimalizací.

Optimální volba řezných podmínek má zajistit s potřebnou rezervou docílení efektů rychlostního obrábění, ale většinou již není žádoucí další navyšování řezné rychlosti, které by urychlovalo difuzní procesy a opotřebení břitu nástroje. Podle obráběného materiálu i průměru (počtu zubů u frézování) se může značně lišit vzájemný poměr využitelné rychlosti posuvů k otáčkám vřetene. Při volbě optimálních řezných podmínek jsme značně omezeni nástrojem, strojem a jeho řídicím systémem. Málokdy může být použita ideální řezná rychlost pro vyspecifikovanou kombinaci řezného a obráběného materiálu. Nepřiměřená volba a špatné rozhodnutí mohou způsobit neefektivnost technologických operací, selhání či havárii nástroje i vřetene.

Soubor progresivních řezných nástrojů již existuje v relativně širokém sortimentu renomovaných výrobců a dodavatelů. Jako představitele lze uvést: COROMANT TIZIT, KENAMETAL - HERTEL, VALTER, ISKAR, A DALŠÍ..... JAKO PRAMET A SAINT - GOBAIN Turnov. Sortiment uvedených výrobců byl v posledních letech ověřován na katedře KOM-TU v Liberci.

Závěry z provedených zkoušek byly využity k sumarizaci a teoretickému zpracování. Výkonová optimalizace na řezných materiálech je cílena na stanovení mezí pro aplikovatelné řezné rychlosti. Výstupem je pak soubor VB – T grafů opotřebení břitu. Pro potřeby Taylorova vztahu:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad (4.1)$$

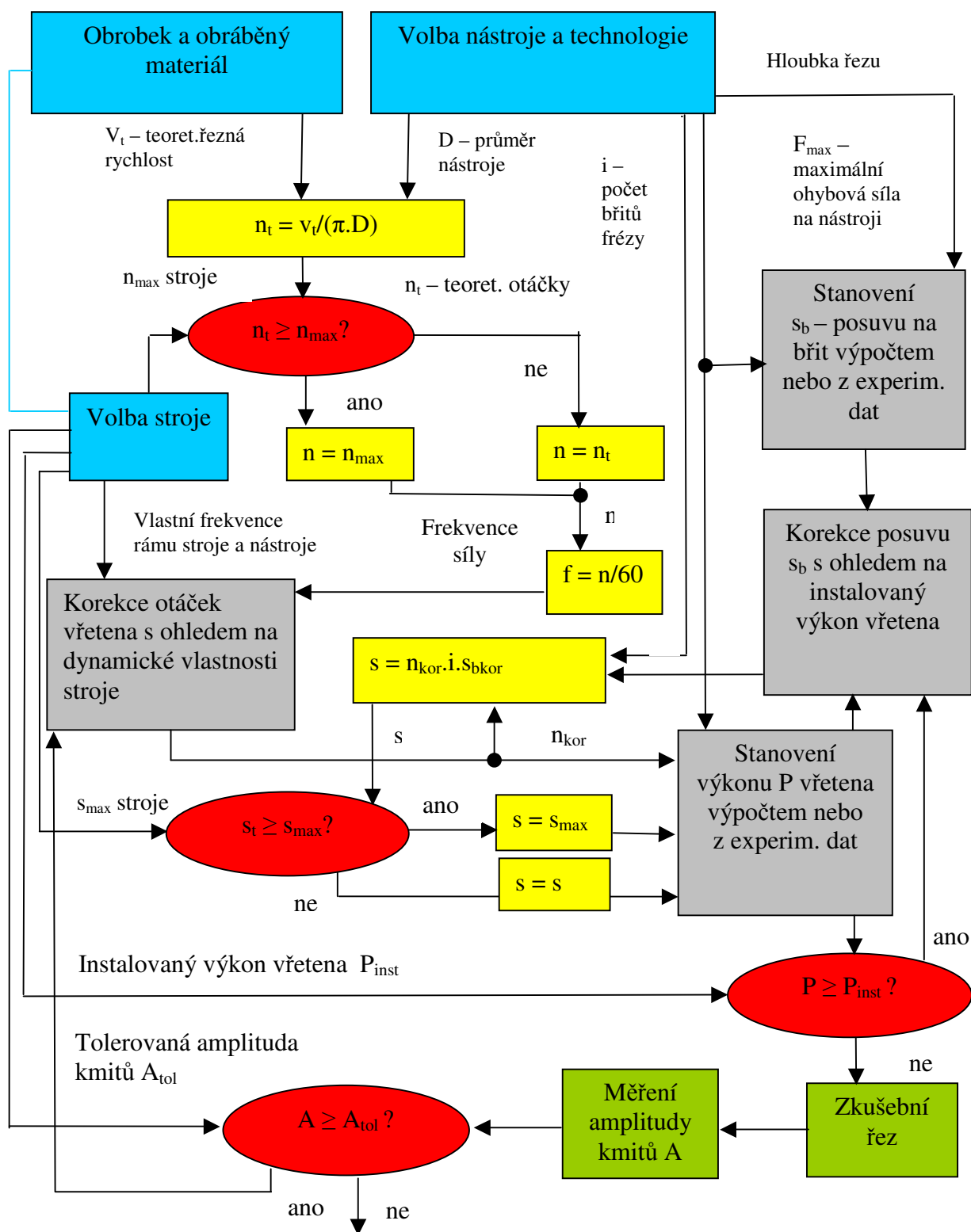
jsou odvozeny hodnoty exponentů m , konstant C_T a C_v ze vztahu :

$$\frac{1}{C_T^m} = C_v \quad (4.2)$$

$$v_c = \frac{C_v}{\frac{1}{T^m}} \quad (4.3)$$

Dle velikosti exponentů m lze pak usuzovat na řezivost a vhodnost řezného materiálu pro rychlostní obrábění (vyšší hodnoty m signalizují intenzivnější vliv v_c na opotřebení břitu a naopak).

Následující schéma popisuje možný algoritmus pro optimalizaci a korekci řezných podmínek v HSC technice při uplatnění omezení, která plynou z: instalovaného výkonu, maximálních otáček a dynamiky rámu stroje.



4.1 SK a povlakované SK na šedé litině

(bez kapaliny, s kapalinou, s mlhou)

Zkouška provedena na materiálu: brzdové bubny FABIA

Pro skupinu nepovlakovaných SK byly použity:

Řezná rychlost: v_c 137 - 175 m/min.

Materiál obrobku: šedá litina jakostní skupina GG 25 dle DIN 1691.
Je zde uvedeno porovnání vlivu čtyř různých technologií slévání
(ČR - CZA, CZB, CZC ; BRD – GER)

Řezná destička: K 10 SPGN 12 0308 z banky řezných materiálů Düsseldorf.
Geometrie: $\alpha_o=6^\circ$, $\gamma_o=5^\circ$, $\chi=75^\circ$, $\lambda_s=0^\circ$

Hloubka řezu: $a_p = 2$ mm

Posuv : $f_1 = 0,1$ mm ot⁻¹
 $f_2 = 0,2$ mm ot⁻¹

Vše pro obrábění kůry i pod kůrou, s vyhodnocováním opotřebení VB i VN.

T - V diagram aproximován do rychlostí $v_c = 200$ m/min.

Vše pod hranicí $v_c = 200$ m/min pro rychlostní obrábění . Průměrná trvanlivost ~10 - 20 min.

Zkoušky pro brzdové bubny: CZA, CZB, GER + CZC → dle dodavatele.(dodatek).

Šedá litina GG 25 - DIN 1691

$v_1 = 137$ m/min, $v_2 = 171$ m/min, $f = 0,1$ mm/ot, $a_p = 2$ mm, destička K 10, posuv upraven z 0,2 na 0,1 mm/ot.

Bylo určeno: (z měření opotřebení VB)

CZA $v_{12} = 175$ m/min

CZB $v_{12} = 162$ m/min

Pro T = 12 min

GER $v_{12} = 142 \text{ m/min}$

Průměrné indexy obrobiteľnosti jsou: $i = \frac{v_T}{v_{Te}}$ (4.4)

CZA $i = 1,00$ - nejlépe obrobiteľné

CZB $i = 0,93$

GER $i = 0,81$ - nejhůře obrobiteľné

Dále : z měření opotřebení VN

CZA $v_{12} = 165 \text{ m/min}$ $i = 1,00$

CZB $v_{12} = 145 \text{ m/min}$ $i = 0,88$ Pro $T = 12 \text{ min}$

GER $v_{12} = 128 \text{ m/min}$ $i = 0,78$

Pozn.: Vliv kůry je u vložek válců GER velmi výrazný..

Tedy CZC je ekvivalentem k CZA v celém rozsahu rychlostí v_c (135 - 175) m/min, při posuvu $f = 0,1 \text{ mm/ot}$ a řezném materiálu K 10.

Grafické stanovení exponentu m Taylorova vztahu:

Tabulka č.6: α_i úhel sklonu získaný z přímky v T - v diagramu

Úhel	Materiál	Pod kůrou	Pod+ kůra	Kůra
$\alpha 1$	CZA, CZC	72°	66°	74°
$\alpha 2$	CZB	68°	72°	72°
$\alpha 3$	GER	86°	68°	66°

$$\text{tg } \alpha_i = m_i \quad (4.5)$$

Tabulka č.7: konstanty m

Konstanta	Materiál	Pod kůrou	Pod+ kůra	Kůra
m1	CZA, CZC	3,08	2,25	3,49
m2	CZB	2,47	3,08	3,08
m3	GER	14,3	2,47	2,25

Pozn.: Skupina GER vykazuje nevyrovnaný charakter m.

Dále: hodnoty C_v jsou měřitelné v T - v (na ose log. v).

Tabulka č.8: konstanty C_{v5}

	Materiál	Pod kůrou	Pod+ kůra	Kůra
C_{v5}	CZA, CZC	2,41	2,42	2,34
C_{v5}	CZB	2,39	2,40	2,36
C_{v5}	GER	2,32	2,36	2,38

Pozn.:

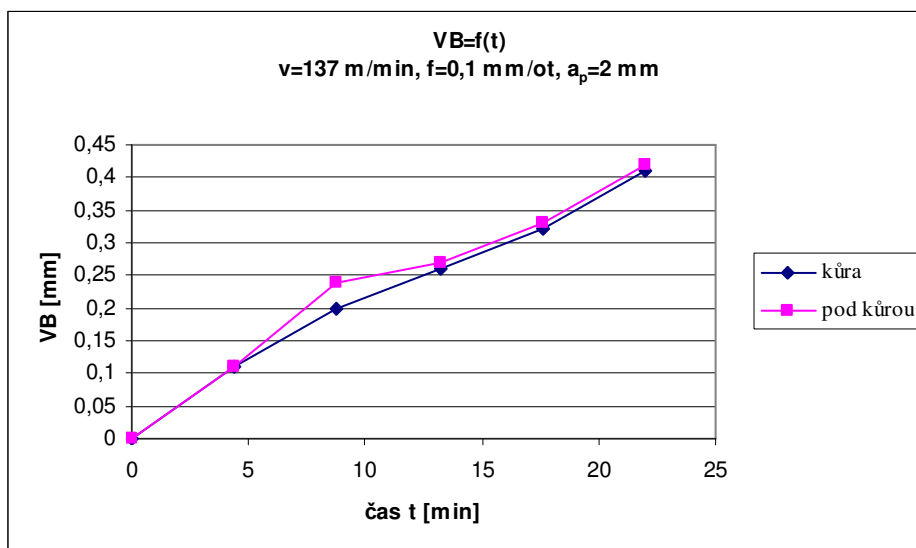
C_{v5} pro T min = 5 minut (nejde o C_v Taylorova vztahu)
vše pro v_c (100, 200) m/min a průměrnou trvanlivost T = 12 min
Všechny skupiny CZA, CZB, CZC, GER vykazují malý přínos úvodního
odstraňování kůry.

Tím byly zmapovány čtyři základní technologie (slévárenské) od čtyř
anonymních dodavatelů litiny na brzdové bubny GG 25 dle DIN 1691.

Vše řezným materiálem K 10 SPGN 120308 a stavitelným držákem KARNED
CS KPR 16 CA - 12. Bez řezné kapaliny.

ZÁVĚRŮ LZE VYUŽÍT JAKOŽTO PŘEDSTAVITELE OBRÁBĚNÍ ŠEDÉ
LITINY NEPOVLAKOVANÝM SK MATERIÁLEM PRO:

$v_c = 100 - 200$ m/min a posuvech 0,1 - 0,2 mm/ot. Při T = 10-20 minut.



Obr. č.25: Graf $VB = f(t)$ pro nepovlakovaný SK.

Pro skupinu povlakovaných SK byly použity:

Zkouška provedena na materiálu: VLOŽKY - VLA, VLB - kapalina
 - mlha
 - bez kapaliny

Dodavatel vložek válců: firma AGS Jičín.

Řezný materiál: - sandvik COROMANT SNMG 120412 - KM GC 3015

(substrát K 10 + povlak TiN - s utvařečem)

- TIZIT SNMG 120412 - EN - TMR Gm 517

(substrát K 15 + povlak TiN - s utvařečem)

Materiál obrobku: Šedá litina GG 25 - DIN 1691 → ČS ekvivalent 422425

$v = 200 \text{ m/min}$, $f = 0,35 \text{ mm/ot}$, $a_p = 2,5 \text{ mm}$

$f = 0,41 \text{ mm/ot}$, $a_p = 3,0 \text{ mm}$

Dva soubory vložek: VLA údajně měkčí

(dle výrobce)

VLB údajně tvrdší

COROMANT (substrát K 10) $T \geq 20 \text{ min}$ ($T_{\text{max}} = 40 \text{ min}$)

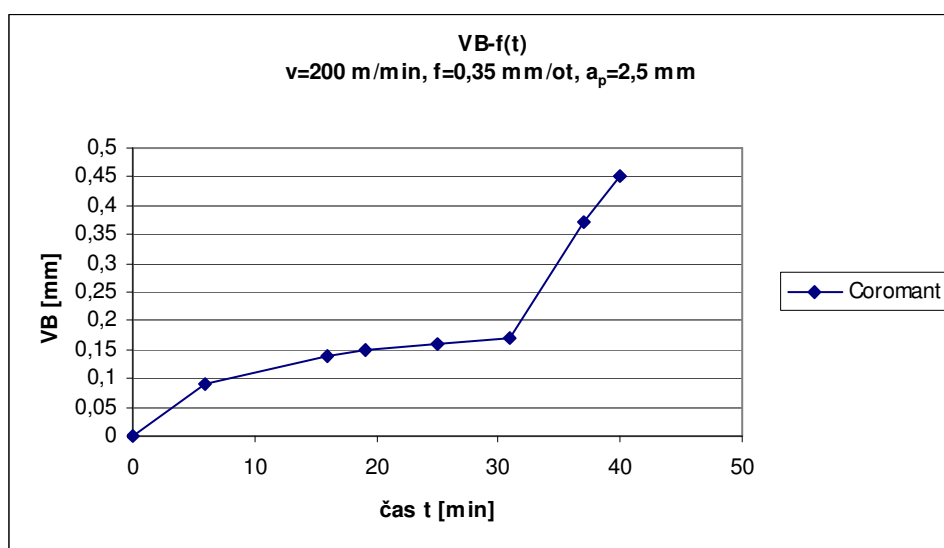
TIZIT (substrát K 15) $T = 10\text{-}2 \text{ min}$

Vše shodné pro: kapalinu, mlhu, bez chlazení.

Vliv navýšení f a a_p na 0,41 mm/ot, 3 mm.

Uvedené navýšení nemá podstatný vliv na dosahovanou trvanlivost T .

Současně se ukazuje, že reálné hodnoty trvanlivosti pro $v_c \approx 200 \text{ m/min}$ jsou rozmezí **20-40 min**. Při aplikaci $v_c > 200 \text{ m/min}$ je třeba počítat s trvanlivostí ≈ 10 minut i méně (pro v_c do cca 350 - 400 m/min).



Obr. č.26: Graf $VB = f(t)$ pro povlakovaný SK.

4.2 Řezná keramika na šedé litině

(vývojové práce pro SAINT GOBAIN)

Zkouškami je zachycena oblast řezných rychlostí **225 - 480 m/min** a trvanlivost $\approx 20 - 170 \text{ min}$. Výkonovou optimalizací a extrapolací pro řeznou rychlost $v_c \geq 480 \text{ m/min}$, jsou výsledky prodlouženy až do oblasti nad **1000 m/min**. Zařízení v laboratořích KOM v současnosti neumožňuje tuto oblast experimentálně ověřit.

První krok v tomto směru byl učiněn instalací stroje NC → SPT 32 o větším výkonu a dálkového snímání opotřebení (KYOSERA).

Soubor keramických řezných materiálů SAINT - GOBAIN Turnov a výběr konkurenčních- porovnávacích materiálů z dodávek SAINT - GOBAIN.

Keramika: bílá, šedá, směsná, černá, SIALON, POVLAKOVANÁ. Vše na šedé litině - vložky válců velkého (~ Ø200) průměru.

Vše podchyceno souborem VB - T diagramů opotřebení břitu, které jsou k nahlédnutí v příslušných pracích. Následně zpracováno do T - v diagramů s určením konstant C_T , m pro Taylorův vztah. Tento je rozšířen o vlivy f , ap na souboru výše uvedených materiálů nástrojů i materiálů obrobků.

Analyzována je klesající tendence exponentu m (viz. v_c^m v Taylorově vztahu).

Tabulka č. 9: Konstanty Taylorova vztahu a zvolená kritéria opotřebení

Řezný materiál	VBK [mm]	m [-]	C_T [-]	C_V [-]
SN 300	0,38	1,48	$2,28^4$	896,63
SL 800	0,42	3,14	$7,93^8$	687,31
G – 6	0,40	2,59	$5,10^7$	958,24
FMG 121 C	0,47	2,96	$4,82^8$	848,77
FMG 134 C	0,35	1,64	$3,54^5$	2435,29
Alpha Sialon	0,54	1,31	$3,65^4$	3006,61
D – 420	0,40	2,71	$1,10^8$	930,18
D – 220	0,34	2,61	$2,03^8$	1510,86
D – 230	0,32	1,88	$2,41^6$	2517,57
C-TM-1-5	0,35	2,92	$4,75^8$	946,36
Toshiba	0,35	7,08	$6,30^{19}$	628,61
D – 210	0,32	1,71	$1,00^6$	3234,39
D – 210f	0,62	9,92	$2,49^{26}$	458,12
D – 220f	0,50	-1,88	$6,07^{-4}$	50,89
D – 400	0,40	2,20	$3,56^7$	2728,20
D – 400f	0,66	8,44	$1,1778^{23}$	542,37
HP650 FMG 122 C	0,40	0,95	$2,91^4$	49565,59
P1	0,50	3,73	$1,29^{10}$	514,06
A3	0,40	1,73	$1,82^5$	1080,58
A4	0,52	7,58	$4,59^{20}$	532,26

Tabulka č. 10: Porovnání hodnot řezných rychlostí pro dané trvanlivost

Řezný materiál	Řezná rychlost v_c [m/min]	
	T = 3 min	T = 5 min
SN 300	426	301
SL 800	484	411
G – 6	626	514
FMG 121 C	586	493
FMG 134 C	1246	912
Alpha Sialon	1301	881
D – 420	620	513
D – 220	992	816
D – 230	1402	1068
C-TM-1-5	649	545
Toshiba	538	501
D – 210	1701	1262
D – 210f	410	390
D – 220f	91	120
D – 400	1655	1312
D – 400f	476	448
HP650 FMG 122 C	15605	9118
P1	383	334
A3	573	427
A4	460	430

5. VYÚSTĚNÍ PRO APLIKACE V JUS – KONSTRUKČNĚ TECHNOLOGICKÉ ZÁVĚRY

S odvoláním na kapitolu č. 1, kde byl popsán a vyčleněn pojem vysokorychlostního obrábění ze standardního, vyvstávají dané problémy spojené s použitou vysokou řeznou rychlostí.

Přechodové podmínky při rozběhu i doběhu vřeten a suportů se projeví v setrvačných silách a momentech. Jejich nárůst je možno (alespoň částečně) eliminovat speciálním řešením kinematických schémat a snížením momentů setrvačnosti (hmoty, měrové hmotnosti, průměry).

To vše v úhrnu představuje relativně široký soubor **technických** (i **ekonomických**) zásahů do řešení strojů a jejich pohonů (rotace i posuvu). Ve značné

míře se to týká CNC tří až pěti-osých obráběcích center pro obrábění prostorových ploch součástí.

Pro **bezprostřední** a **ekonomičtější** realizaci je vhodné (i v minulosti) aplikace právě v oblasti zmíněných JUS, kam tato diplomová práce rychlostní obrábění směřuje.

Jak uvidíme dále, zde většinou odpadá problematika speciálních řešení posuvových mechanismů (rychlosti i zrychlení jsou zde standardní). Problematika rychlostních vřeten je zvládnuta dodávkami renomovaných výrobců podskupin a speciálními úpravami standardních provedení uložení vřeten, případně vhodnou aplikací hydrostatických, pneumostatických kluzných ložisek v kombinaci s malými průměry a lehkými materiály vřeten.

Ke zvýraznění problematiky dále uvedeme:

HSC obrábění přináší řádové zvětšení řezných rychlostí v_c přes **200m/min** pro ocel a přes **800m/min** pro lehké slitiny. Z toho vyplynou požadované otáčky vřeten **10 000ot/min**. Tomu odpovídá nutnost zvětšit posuvové rychlosti v_f zpravidla přes **5m/min**. To jsou z dřívějšího pohledu rychlosti na počátku rychloposuvů (klasické posuv.rychl. $v_f = 1\text{m/min}$ a zrychlení **2 m/sec**). Závažnější je, též uváděný, požadavek zrychlení nebo zpoždění zhruba **5 m/sec²** a z toho odvozené dynamické síly a momenty, které při interpolaci naprogramované dráhy u CNC strojů přináší nepříjemné zvýraznění dynamických odchylek.

Tyto závěry - deklarované v uvedené práci - jsou jistě závažným problémem, který se musí odrazit např. v konstrukčním řešení posuvových pohonů - s dopady do **ekonomiky** řešení.

Při aplikacích HSC obrábění na původně klasické JUS většinou odpadá interpolace dráhy a nároky na dynamiku posuvných mechanismů (bez vazby mezi osami x,y,(z)) ustupují do pozadí. Zůstává pouze problém vysokootáčkových vřeten, který je relativně méně náročný. Vřetena pro **n = 10 000 - 30 000 ot/min** jsou již běžná. Vřetena do **15 000 ot/min** lze získat úpravou původního standardního řešení.

Tolik úvodem k vymezení tématu z hlediska technického provedení strojů JUS pro rychlostní obrábění.

5.1 Uspořádání HSC pro využití v JUS

Vše s odvoláním na předešlé grafy. **Fe – Fe₃C** a **IRA – ARA** (obr. č. 8 a 9) a materiál obrobku OCEL, ŠEDÁ LITINA.

	θ [°C]	v_c [m/min]	název
Skupina A:	230 - 720	80 - 200	<i>výkonové</i>
Skupina B:	720 - 810	200 - 600	<i>vysokorychlostní</i>
Skupina C:	810 - 1130	600 - 900	<i>superrychlostní</i>
Skupina D:	1130 - (1250, 1400)	900 - (1300)	<i>ultrarychlostní</i>

Bez uvažování MLHOVÁNÍ NEBO CHLAZENÍ KAPALINOU.

Pozn.:

1. Při aplikaci MLHOVÁNÍ se teploty řezání **θ** posunou o jednu skupinu níže ve směru A → D. (Při zachování **v_c**).
2. Při aplikaci *CHLAZENÍ KAPALINOU* na vodní bázi se teploty řezání **θ** posunou o jednu až dvě skupiny níže ve směru A → D. (Při zachování **v_c**).
3. Závěry ad1, ad2 mohou mít za následek ZACHOVÁNÍ nebo dokonce SNÍŽENÍ trvanlivosti břitu nástroje při aplikaci kapaliny oproti práci bez řezných kapalin.
Citlivé na „doladění“ **v_c** ve vztahu k průtokovému množství řezné kapaliny.
4. Základní pravidlo při aplikaci CHLAZENÍ (u SK, povlakovaných SK, řezné keramiky, CBN, PKD) je:

„ *Když chladit - tak velkými průtokovými množstvími*“ nebo raději „ *BEZ CHLAZENÍ*“.

5. Obrábění šedé litiny - preferovat **BEZ CHLAZENÍ i bez mlhování**.

Chladicí kapalina na vodní bázi (s mazací složkou z kysličníků kovů i nekovů) o vysokém průtokovém množství na skupinu nástrojů ($Q \gg 100 \text{ l/min}$) se používá pro efekt:

- a) Automatické odtřískování obráběcí zóny i stroje a při třísece vysoce utvářené.
- b) Globální překrytí řezných podmínek při různorodosti používaných řezných materiálů v aut.linkách a složitých JUS, VUS.

Vše v návaznosti na centrální **třískové hospodářství**.

Pro aplikace rychlostního obrábění v JUS a LINKÁCH v přechodovém období od I. generace JUS k II. generaci s rychlostním obráběním vyvstává otázka rizika návrhu a realizace stroje bez systému řezných kapalin - z pohledu následného zprovoznování. Druhý problém vyvstává v tom smyslu, že vyloučením aplikace řezné kapaliny eliminuje možnost využití náporového účinku v odtřískovacím procesu automatizovaných systémů JUS a LINEK.

Pro předchozí období je sloučený kompromis:

ZACHOVÁNÍ SYSTÉMU ŘEZNÝCH KAPALIN, ALE S DIFERENCOVANÝM VYUŽITÍM VE VLASTNÍM ŘEZNÉM PROCESU. (SKUPINY NÁSTROJŮ „BEZ ŘEZNÝCH KAPALIN“).

5.2 Trvanlivost břitu v JUS

Pro standardní JUS se aplikuje trvanlivost cca (**90 - 180**) min nebo (**60 - 120**) min. To odpovídá zhruba 1/2 - 1 směně bez výměny nástrojů a bez nutnosti aplikovat automatickou výměnu s monitorizací opotřebení břitu.

Zjednodušení základní koncepce JUS je z toho patrné. Výkonové (kusové) omezení z toho plynoucí jsou zřejmá, vyvážená provozní spolehlivosti složitějších řešení JUS a LINEK (např. jeden JUS s jedno-obslužnou koncepcí a 1,5 směnným provozem nahradil dílnu s 10-ti pracovišti - 10-ti pracovníky v 2,5 směnné variantě - těleso regulátoru toku oleje LIAZ VALDICE - stroj LKI 371).

Na uvedenou podmínku lze aplikovat klasický i rozšířený *Taylorův* vztah pro trvanlivost břitu:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad (5.1)$$

$$T = \frac{C_T}{v_c^m \cdot f^y \cdot a^x} \quad (5.2)$$

určení v_c s korekcí dle f , a_p .

Trvanlivost - opotřebení břitu ve vazbě na dodržení požadované tolerance obrobku, případně drsnosti povrchu a geometrické přesnosti tvaru, je okolnost nadřazená klasické prosté trvanlivosti (z pohledu funkčnosti - řezivosti - nástroje). V II. generaci JUS a LINEK je ji třeba zakotvit ve zpětnovazebním sledování a automatickém (případně ručním) „DOSEŘÍZENÍ“ nástrojů.

Kvalitativně vyšších výsledků je v tomto směru dosahováno právě aplikací progresivních řezných materiálů (SK pvl., keramika, pvl. keramika - a hlavně CBN, PKD).

5.3 Současná omezení HSC obrábění v JUS

Kapitola je zařazena jako přechodová od rychlostního obrábění k vlastním JUS, VUS, LINKÁM tzv. II. generace - pro rychlostní obrábění - viz. kapitola 2.

Přiřadit můžeme orientační v_c [m/min] následovně:

vysoké v_c : 200 - 450 m/min
super v_c : 450 - 650 m/min
ultra v_c : 650 - 900 - 1300 m/min

Pro OCEL - ŠEDÁ LITINA.

Pro BAREVNÉ A LEHKÉ SLITINY se jedná o řezné rychlosti 2,5 - 4 - (8) krát výše. Vše s odkazem na literární řešerše v kapitole 1.

Omezení otáčkami vřeten: (ve vazbě na potřebné v_c)

$n = 10^4 \div 3 \cdot 10^4$ ot/min	$n \leq 10^5$ ot/min
Běžně k dispozici	V realizaci hydrostatického,
ve valivém provedení.	pneumostatického ložiska.

Omezení posuvnými rychlostmi v_f :

Zapadají do dřívějších oblastí *RYCHLOPOSUVŮ* posuvových jednotek a jsou tedy prakticky (mimo oblast ULTRA) - *Bez zvláštního omezení*.

Omezení řeznými materiály:

V závislosti na jejich teplotních charakteristikách. Je v současnosti pokryta prakticky celá oblast aplikací, tudíž: - *Bez zvláštního omezení*. (speciální případy se neuvažují).

Omezení z pohledu utváření třísky:

- Oblast pro v_c (200 ÷ 450) [m/min] - prakticky plně pokryta PŘIROZENÝM NEBO NUCENÝM utvářením třísky LITINOVÉ, OCELOVÉ.

- Oblast pro v_c (450 ÷ 650) [m/min] -

Bez omezení pro ŠEDOU LITINU - přirozené utváření

Problematické pro OCEL (spec. metody nuceného utváření)

- Oblast pro v_c (650 →) [m/min]

Bez omezení pro ŠEDOU LITINU - přirozené utváření

Neřešeno pro OCEL - chystá se ověřování mechanicko-hydraulické soustavy.

- Barevné a lehké litiny se řeší parametrem **pl**. (plasticita materiálu obrobku) v kombinaci s přirozeným utvářením. (např. Si legování u slinit Al).

Omezení z pohledu aplikace řezných kapalin:

- Pro šedou litinu prakticky bez omezení - bez řezných kapalin - *EKOLOGICKÉ OBRÁBĚNÍ*.

- Pro ocel je vyloučení řezných kapalin problematické - možná náhrada *MLHOU*.

Vše v oblasti kapalin na vodní bázi - nikoliv klasické řezné oleje - ty nevyhovují pro vysoké teploty řezání θ (nadměrný dým + ztráta účinku). Vše ve vazbě na docilovaný povrch po obrábění - potom teprve hledisko trvanlivosti bříty.

5.4 Druhá generace JUS, VUS, AUT. LINEK

Uvedená kapitola je logickým vyústěním hlavní osy práce. Může být proto pojata jako shrnutí hlavních atributů a vytyčení dalších směrů vývoje.

Použijeme upravené vstupní dělení rychlostního obrábění –
vysoké - super vysoké - ultra vysoké
vysoké - velmi vysoké (kapitola 1.)

a to následovně:

Rychlosti: $\frac{\text{vysoké}}{A}$ - $\frac{\text{velmivysoké}}{B}$ <
a) super
b) ultra

Oblast A : především pro OCEL - ŠEDÁ LITIN

$$v_c \text{ do } 600 \text{ m/min}$$

$$n = 10^4 \div 3 \cdot 10^4 \text{ ot/min}$$

$$v_f \approx 1 \text{ m/min}$$

$$a_f \approx 1 \text{ m/sec}^2$$

Je základní oblastí pro bezprostřední aplikace v JUS. Vyžadují rychlostní vřetena: -

- speciální

- upravená standardní

Nevyžadují speciální ani zvláště upravené posuvové jednotky. Kuličkový posuvový šroub je však podmínkou.

Oblast B a): především pro OCEL - ŠEDÁ LITINA - BAREVNÉ A LEHKÉ SLITINY.

$$v_c > 600 \text{ m/min} - (\text{do cca } 900 \text{ m/min})$$

$$n = 3 \cdot 10^4 \div 6 \cdot 10^4 \text{ ot/min}$$

$$v_f \approx 2 - 3 \text{ m/min}$$

$$a_f \approx 2 - 3 \text{ m/sec}^2$$

Je základní oblastí pro bezprostřední aplikace v JUS pro barevné a lehké slitiny. Vyžadují spec. rychlostní vřetena (se spec. valivými ložiskovými bloky). Stále vystačí se standardním řešením posuvových jednotek (s kuličkovými šrouby). Nízké hodnoty posuvů **f** ($\approx 0,1 \text{ min/ot}$) snižují nároky na tuhost a následně na hmotnost suportů.

Oblast B b): převážně pro BAREVNÉ A LEHKÉ SLITINY

$$v_c > 900 \text{ m/min}$$

$$n > 6 \cdot 10^4 \text{ ot/min}$$

$$v_f \approx 5 \text{ m/min}$$

$$a_f \approx 5 \text{ m/sec}^2$$

Je oblastí vývojovou - blízkou programovatelné CNC technice. S nutností speciálního řešení rovněž u posuvových jednotek s respektováním zrychlujících (zpožďujících) sil a momentů. Řešení rychlostních ložisek často za hranicí možnosti VALIVÉHO ULOŽENÍ → použití HYDROSTAT nebo PNEUMOSTAT uložení kluzných ložisek.

ZÁVĚR

Předkládaná diplomová práce má analyticko - syntetický charakter s výrazným podílem experimentálně - teoretické složky. Tato práce si kladla za cíl propojit technologickou vývojovou složku z oblasti obrábění a progresivních řezných nástrojů (řezných materiálů) s konstrukčně - technologickou oblastí zaměřenou na JUS techniku.

Hlavním cílem této diplomové práce však bylo zmapovat danou problematiku vysokorychlostního obrábění a vytvořit pokud možno ucelený teoretický základ pro další aplikace i vývoj. Při zpracování této práce bylo využito dosud získaných poznatků v třískovém obrábění a vývoji progresivních řezných nástrojových materiálů.

Řezné procesy, nástroje a stroje jsou dnes bez pochyby hlavním trendem vývoje obráběcích strojů a technologií, zvláště pak pro vysokorychlostní obrábění. Vytvářejí skutečnou revoluci v třískovém obrábění kovů, protože jsou schopny svými parametry zajistit generační skok v intenzifikaci, produktivitě, integraci a celkové racionalizaci řezných procesů. Předpokladem pro aplikaci HSC je ve většině případů použití speciálního obráběcího stroje s vysokootáčkovými vřeteny a rychlými posuvovými mechanismy. Dalším nezbytným předpokladem je samozřejmě i výkonný progresivní řezný nástroj. Zároveň je třeba provést ekonomické zhodnocení přínosu, zejména s ohledem na náklady na strojní hodinu speciálního stroje a nákladů na nástroje.

V rámci této diplomové práce bylo možno dojít k následujícím závěrům:

- Pro vysokorychlostní obrábění platí, že zvyšováním v_c je možno snížit namáhání obráběcího stroje ve všech složkách při zachování výkonu v objemu odebraného materiálu.
- Zmenšováním průřezu třísky lze docílit lepší kvality obrobené plochy, což představuje přechod na dokončovací charakter obrábění při zachování již zmíněného výkonu objemu odebraného materiálu jako při hrubování.
- Se vzrůstem řezné rychlosti dochází k nárůstu objemu vzniklého tepla, které se vlivem snižování koeficientu přechování odvádí převážně třískou. Do obrobku se tudíž převede pouze jeho malá část a z toho pak vyplývá vyšší geometrická přesnost obrobku. Zároveň se délka kontaktu třísky s čelem zmenšuje a rychlost odchodu třísky

z čela narůstá. V důsledku toho dochází k nižšímu opotřebení břitu nástroje. Vysoká teplota třísky působí rovněž proti „zpevnění za studena“ v třísce a eliminace tohoto jevu se výrazně projeví u žárupevných slitin a těžko obrobitelných ocelí.

- Z toho je zřejmé, že intenzivní chlazení nástroje řeznou kapalinou již není nutné ani žádoucí neboť by se bránilo dosažení efektu vysokorychlostního obrábění. Směřuje k ekologickému obrábění bez použití řezných (nižší náklady).

- Se zvyšováním v_c se zvětšuje úhel střížné roviny a tím se zmenšuje primární plastická deformace, následkem čehož má tříska sklon k plynulosti (u ocelí). Z tohoto hlediska je HSC obrábění bezproblémové pro litinu. U ocelí musí být tento vliv eliminován podporou nuceného utváření třísky použitím speciálních metod.

- Mimo uvedeného, byly v práci též podchyceny teoretické závěry z experimentálních prací na progresivních řezných materiálech vhodných pro rychlostní obrábění na šedé litině. Z analýzy exponentu m Taylorova vztahu byla vidět klesající tendence, což signalizuje menší vliv řezné rychlosti na opotřebení nástroje.

- S vysokou v_c vnikají při rozběhu a doběhu vřeten a suportů velké setrvačné síly a momenty, které je možno eliminovat speciálním řešením kinematických schémat (HSC je převážně spojováno s obráběním prostorových ploch. Při aplikaci HSC na původně klasické JUS většinou odpadá interpolace dráhy a nároky na dynamiku posunových mechanismů (bez vazby mezi osami x , y , z) ustupují do pozadí. Zůstává pouze problém řešení vysokootáčkových vřeten. Z toho bezpodmínečně plyne nižší ekonomická náročnost.

Závěry pro další vývoj a výzkum:

- Při psaní diplomové práce se ukázalo, že je nutné pokračovat v ověřování progresivních řezných materiálů v oblasti obrábění ocelí, včetně možností EKOLOGICKÉHO obrábění v oblasti povlakovaných SK a ŘEZNÉ KERAMIKY.

- Dále by pak bylo vhodné řešit otázku PŘEDLISOVANÝCH UTVAŘEČŮ na řezné keramice (při použití řezné rychlosti nad 450 m/min).

SEZNAM LITERATURY

- [1] HOLUB, L.: *Jednoúčelové stroje a linky*. Liberec, TUL 2002.
- [2] HOLUB, L. – SÍDA, V.: *Řezná keramika I,II, III*. Liberec, TUL 2001 – 2003.
- [3] HOLUB, L. a kol: *Zkoušky aplikací SK, povlak. SK na šedé litině*.
- [4] BORSKÝ, V.: *Jednoúčelové a víceúčelové stroje*. Brno, VUT 1985.
- [5] Sborníky: *EMO 1999, EMO 2001*
- [6] PŘIKRYL, Z. – MUSÍLKOVÁ, R.: *Teorie obrábění*. 3.vyd. Praha, SNTL/ALFA 1982.
- [7] BUDA, J. – SOUČEK, J. – VASILKO, K.: *Teória obrábania*. 1.vyd. Bratislava, ALFA 1983.
- [8] MÁDL, J. – KVASNIČKA, I. : *Optimalizace obráběcího procesu*. 1. vyd. Praha, ČVUT 1998.
- [9] AB SANDVIK COROMANT, Sandviken: *Příručka obrábění*. Sandvik CZ 1997.
- [10] Zelený, J: *MM Speciál*. [Časopis] Průmyslové spektrum, červen 2000.